

Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département : Génie Electrique

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**Baali Brahim**

**Belkacimi Mebrouk**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : **ÉLECTROMECHANIQUE**

Option : **Électromécanique**

**Thème**

Etude des défauts rotoriques de la machine asynchrone à cage d'écureuil

**Devant le jury composé de :**

Mme. AGGOUN  
S.BENSAID  
Mr. BOUZIDA

MAA  
Prof  
MCA

UAMOB  
UAMOB  
UAMOB

Président  
Examineur  
Encadreur

Année Universitaire 2019/2020

## *Dédicaces*

---

### **Je dédie ce travail à**

Mes chers parents que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur Patience illimitée, pour leur encouragement continu, leur aide et leur grand sacrifice ; Mes chers frères et mes chères sœurs pour leur soutien et leur encouragement ;

Personnes les chères ;

A toute la famille **BAALI** ;

A tous mes amis et à tous ceux que j'aime sans exception ;

A mes amis et mes collègues de la promotion :

« 2ème Master électromécanique ».

**BAALI BRAHIM.**

**Je dédie ce travail à**

Mes chers parents que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, pour leur encouragement continu, leur aide et leur grand sacrifice ;

Mes chers frères et mes chères sœurs pour leur soutien et leur encouragement ;

Personnes les chères ;

A toute la famille **BELKACIMI** ;

A tous mes amis et à tous ceux que j'aime sans exception ;

A mes amis et mes collègues de la promotion :

« 2ème Master électromécanique ».

**BELKACIMI MEBROUK.**

---

## *Remerciements*

---

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du département de Génie Electrique d'Université Akli Mohand Oulhadj Bouira.

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

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Monsieur BOUZIDA.A Pour avoir d'abord proposé ce thème, pour le suivi continu tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.

Nous tenons à remercier du fond du cœur Mme YASSA. N pour leur aide, conseils et leurs remarques.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont fait l'honneur d'examiner notre travail.

Enfin, nos remerciements à toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Merci à vous tous.

# Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
<i>Chapitre 01</i> .....	3
PRÉSENTATION DES DÉFAUTS DE LA MAS ET SES DÉFAILLANCES.....	3
1.1. Introduction.....	3
1.2. Constitution d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	3
1.2.1. Le stator (partie fixe).....	4
1.2.2. Le rotor (partie mobile).....	5
1.2.3. Les paliers.....	6
1.3. Présentation des différents défauts de la machine asynchrone.....	6
1.4. Les causes des défauts [12].....	7
1.4.1. Défauts statorique.....	7
1.4.2. Défauts rotorique.....	8
1.4.2.1. Rupture de barre.....	8
1.4.2.2. Ruptures de portions d'anneaux de court-circuit [18].....	9
1.4.2.3. Défauts d'excentricité.....	10
1.4.2.4. Défauts des roulements.....	11
1.5. Conséquences des défauts.....	12
1.6. Conclusion.....	13
<i>Chapitre 02</i> .....	14
PERFORMANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE SANS DÉFAUTS.....	14
2.1. Introduction.....	14
2.2. ANSYS Maxwell.....	14
2.2.1. Editeur du logiciel.....	14
2.2.2. Présentation du logiciel.....	15
2.2.3. RMXprt.....	15
2.3. Etapes de la conception sur le module RMxprt.....	15
2.3.1. Dimensions générales du stator.....	17
2.3.2. Dimensions principales de l'encoche statorique.....	18
2.3.3. Dimensions principales du rotor.....	18
2.3.4. Dimensions de l'encoche rotorique.....	19
2.3.5. Configuration du bobinage.....	19
2.3.6. Choix des matériaux.....	21

2.4. Validation du modèle et exportation des résultats.....	22
2.4.1. Paramètre nominaux.....	22
2.4.2. Fonctionnement nominal.....	23
2.4.3. Fonctionnement à vide.....	25
2.4.4. Fonctionnement avec rotor bloqué.....	25
2.4.5. Paramètres électriques et magnétiques.....	25
2.4.6. Paramètres de simulation pour les modèles en 2D.....	26
2.5. Les caractéristiques statiques de la machine.....	27
2.6. Analyse des caractéristiques dynamiques de la Machine.....	30
2.6.1. Validation du modèle 2D et exploitation des résultats.....	31
2.6.2. Distribution de l'induction magnétique.....	31
2.6.3. Résultats de simulation pour la machine saine.....	33
2.7. Conclusion.....	35

### *Chapitre 03.....*

36

#### ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES DE LA MACHINE EN PRÉSENCE DES CASSURES DES BARRES..... 36

3.1. Introduction.....	36
3.2. Exploitation des résultats de simulation.....	36
3.2.1. Résultats de simulation pour la machine saine.....	37
3.2.2. Résultats de simulation pour une machine avec une barre cassée.....	39
3.2.3. Résultats de simulation pour une machine avec deux barres cassées.....	43
3.2.4. Résultats de simulation pour une machine avec trois barres cassées.....	46
3.3. Conclusion.....	51

#### CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES..... 52

## Liste des figures

Figure 1-1: Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [5].....	4
Figure 1-2: Constitution typique de la machine asynchrone [6].....	4
Figure 1-3 : Structure du stator [8].....	5
Figure 1-4 : Différentes structures de rotor à cage.....	6
Figure 1-5: Répartition des pannes.....	7
Figure 1-6: Défauts statorique.....	8
Figure 1-7: Rupture de barre.....	9
Figure 1-8: Défaut cassure de barres dans le rotor à cage d'écureuil.....	9
Figure 1-9: Rupture de portions d'anneaux.....	10
Figure 1-10: Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.....	12
Figure 1-11: Dimensions du roulement à bille.....	12
Figure 2-1 : Interface de sélection du type de la machine.....	16
Figure 2-2 : Fenêtre du gestionnaire de projet.....	16
Figure 2-3 : les propriétés de la machine asynchrone.....	17
Figure 2-4 : Dimensions principales du stator.....	17
Figure 2-5: Dimension des encoches statorique.....	18
Figure 2-6 : Dimensions principales du rotor.....	19
Figure 2-7 : Forme d'encoche standard utilisée pour créer l'encoche de la cage.....	19
Figure 2-8: Paramètres et distribution de l'enroulement de la phase A.....	20
Figure 2-9 : Distribution du bobinage statorique (phase A).....	21
Figure 2-10 : Propriétés électrotechniques du matériau utilisé pour la cage.....	21
Figure 2-11 : Propriétés électrotechniques du matériau utilisé dans le circuit magnétique.....	22
Figure 2-12 : courbe de B(H).....	22
Figure 2-13: caractéristique couple-vitesse.....	27
Figure 2-14: caractéristique puissance-vitesse.....	28
Figure 2-15 : caractéristique Facteur de puissance –vitesse.....	28
Figure 2-16: caractéristique rendement-vitesse.....	29
Figure 2-17 : caractéristique courant-vitesse.....	29
Figure 2-18 : caractéristique couple-glissement.....	29
Figure 2-19: caractéristique glissement –puissance.....	30
Figure 2-20 : Le modèle 2D de la machine asynchrone a cage.....	31
Figure 2-21 : Distribution de l'induction magnétique.....	32
Figure 2-22 : Distribution des lignes du champ.....	32
Figure 2-23 : Le couple électromagnétique.....	33

---

Figure 2-24: Allure de la vitesse de rotation.....	33
Figure 2-25 : Courant statorique.....	34
Figure 2-26 : Les courants rotoriques dans le cas d'une machine saine.....	34
Figure 3-1 : Couple électromagnétique pour la machine saine.....	38
Figure 3-2 : Vitesse de rotation pour la machine saine.....	38
Figure 3-3 : Courants statoriques dans le cas de la machine saine.....	39
Figure 3-4 : Les courants rotoriques dans le cas d'une machine saine.....	40
Figure 3-5 : Emplacement de la barre cassée dans le modèle 2D.....	41
Figure 3-6 : Couple électromagnétique pour la machine avec une barre cassée.....	41
Figure 3-7: Vitesse de rotation pour la machine avec une barre cassée.....	42
Figure 3-8 : Les courants statoriques pour une machine avec une barre cassée.....	42
Figure 3-9 : Courants rotoriques pour une machine avec une barre cassée.....	43
Figure 3-10: Emplacement des barres cassées dans le modèle 2D.....	44
Figure 3-11 : Couple électromagnétique pour la machine avec deux barres cassées.....	45
Figure 3-12: Vitesse de rotation pour la machine avec deux barres cassées.....	45
Figure 3-13 : Les courants statoriques pour une machine avec deux barres cassées.....	46
Figure 3-14 : Les courants rotoriques pour la machine avec deux barres cassées.....	47
Figure 3-15: Emplacement des trois barres cassées dans le modèle 2D.....	48
Figure 3-16 : Couple électromagnétique pour une machine avec trois barres cassées.....	49
Figure 3-17 : Vitesse de rotation pour une machine avec trois barres cassées.....	49
Figure 3-18: Les courants statoriques pour une machine avec trois barres cassées.....	50
Figure 3-19: Les courants rotoriques pour une machine avec trois barres cassées.....	51

---

## *Liste des tableaux*

---

Tableau 1 : Paramètres de la machine.....	23
Tableau 2 : Paramètres de la machine pour un fonctionnement nominal.....	24
Tableau 3 : Bilan de puissance pour un fonctionnement nominal.....	24
Tableau 4: Paramètres de la machine pour un fonctionnement à vide.....	25
Tableau 5 : Paramètres de la machine pour un fonctionnement à rotor bloqué.....	25
Tableau 6 : Paramètres électriques et magnétiques pour un fonctionnement nominal.....	26
Tableau 7 : Paramètres de simulation pour les modèles en 2D.....	27

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Ce travail entre dans le cadre d'étude des défauts dans les machines électriques et spécialement le moteur asynchrone à cage d'écurieuil. 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 pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,...

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 dévier les arrêts imprévus.

L'objectif principal de notre travail est l'étude des défauts de cassures de barres rotorique dans un moteur asynchrone triphasé à cage d'écurieuil.

La paternité de la machine asynchrone est controversée, elle pourrait être attribuée à trois inventeurs, en 1887 Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur la machine asynchrone en avril 1888, en 1889 Mikhaïl Dolivo-Dobrovolski un électricien allemand d'origine russe invente la première machine asynchrone à courant triphasé à cage d'écurieuil qui sera construite industriellement à partir de 1891[1].

La compréhension du fonctionnement machine asynchrone avec et sans défaut, ainsi que la vérification des algorithmes de détection des défauts, nécessite la synthèse d'un modèle mathématique décrivant le comportement de la machine d'une façon la plus fine possible, dans cette logique, nous proposons un modèle multi-enroulement basé sur la modélisation de la cage rotorique sous forme de mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement[2], ce modèle tient compte de la distribution réelle des différents enroulements, notamment avec l'implication de l'approche de fonction d'enroulement, puis la fonction d'enroulement modifiée [3], où il est possible de déceler les phénomènes accompagnant une probable excentricité, le modèle est ainsi apte à définir les inductances d'une machine en tenant compte de l'ouverture et /ou l'inclinaison des encoches, et qui peut être étendue à l'étude d'autres types d'asymétrie axiale, à savoir l'excentricité axiale, ainsi, les différents modèles de la machine sont programmés et simulé sous logiciel *MAXWELL*.

Le mémoire est composé de trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présentons les éléments de construction de la machine asynchrone ainsi que les différents défauts pouvant survenir sur chacun d'eux, nous terminons ce chapitre par une synthèse de tous les défauts cités auparavant, en définissant leurs causes et leurs conséquences.
- Dans le deuxième chapitre, on va utiliser l'outil RMxprt pour la conception du modèle de la machine et par la suite étudier et analyser les performances de celle-ci à l'état sain.
- Le troisième chapitre détaille le modèle réel de la machine défaillante dans les cas suivants respectivement : une machine saine (Rotor sain), machine avec une barre cassée, machine avec deux barres cassées en adjacentes, machine avec trois barres cassées en adjacentes.

Enfin, on terminera ce mémoire par une conclusion générale.

# Chapitre 01

## PRÉSENTATION DES DÉFAUTS DE LA MAS ET SES DÉFAILLANCES

---

### 1.1. Introduction

Le moteur asynchrone à cage est le plus utilisé dans notre monde industriel, en raison de sa résistance et de sa robustesse, qui se caractérise par son utilisation classique, après avoir été limité à des vitesses fixes, son application est allée aux vitesses variables. Ces moteurs fonctionnent selon les principes des champs rotatifs, ils sont simples, faciles à utiliser, surtout pour les petits champs, et économiques, ils ont donc trouvé une grande popularité.

Dans ce chapitre, nous décrirons brièvement la constitution du moteur asynchrone, puis nous présenterons les différents types des défauts qui apparaissent dans les machines asynchrones à cage d'écureuil et en définissant leurs causes et leurs conséquences.

### 1.2. Constitution d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil

La machine asynchrone est une machine à induction souvent utilisée comme moteur. Elle comporte un inducteur fixe nommé stator et un induit mobile nommé rotor. La différence de vitesse entre le champ statorique et rotorique est appelée glissement [4].

.La machine asynchrone à cage d'écureuil est constituée des principaux éléments suivants :

- le stator, partie fixe de la machine est connectée l'alimentation électrique.
- le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans les Figures (1-1 et 1-2).

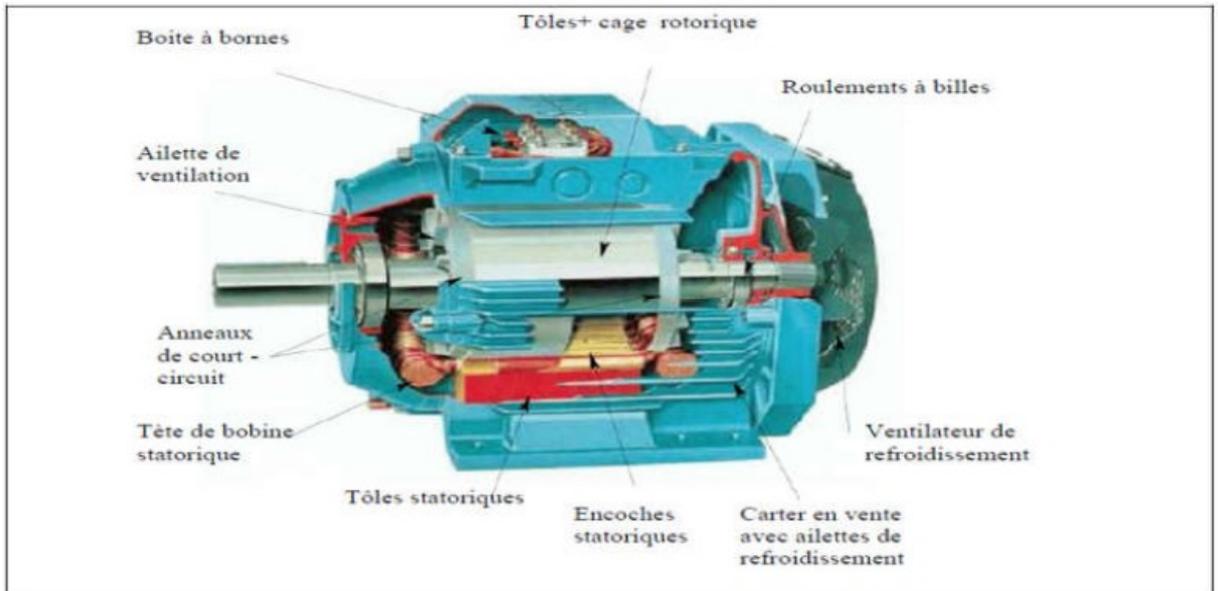


Figure 1-1: Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [5]

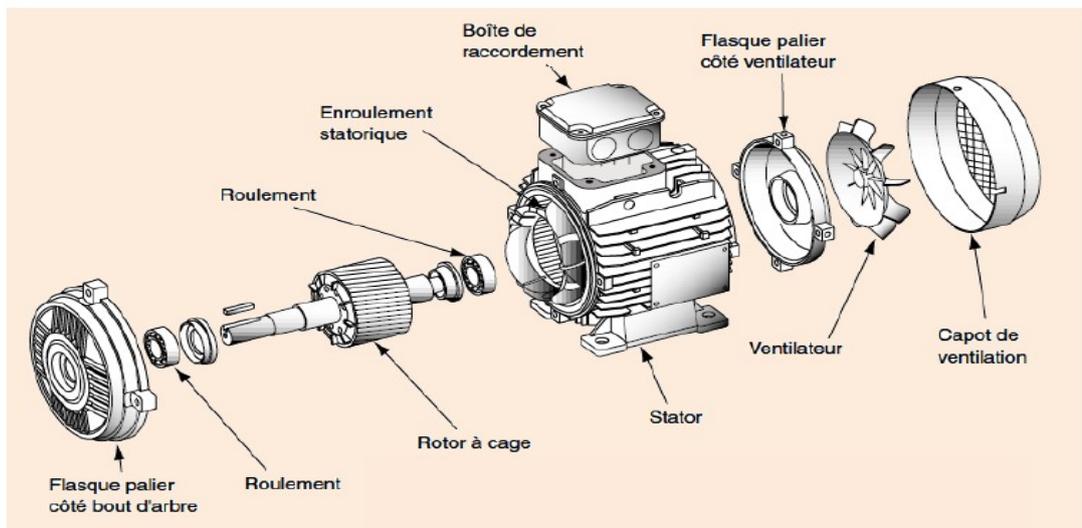


Figure 1-2: Constitution typique de la machine asynchrone [6]

### 1.2.1. Le stator (partie fixe)

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine.

Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [7] :

- Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique.

- Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre.

L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer la distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.

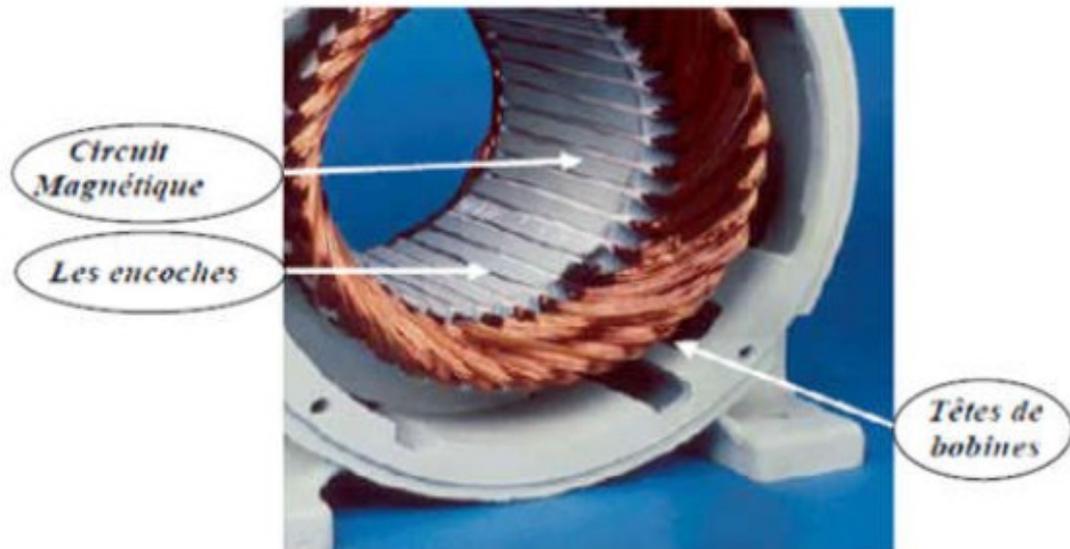


Figure 1-3 : Structure du stator [8]

### 1.2.2. Le rotor (partie mobile)

Les différents types de machines asynchrones ne se distinguent que par leur rotor qui peut être bobiné ou bien à cage. Ce dernier est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension, la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium. On démontre que, si le nombre de barres est suffisamment grand, la cage se transforme automatiquement en un circuit polyphasé de polarité adéquate.

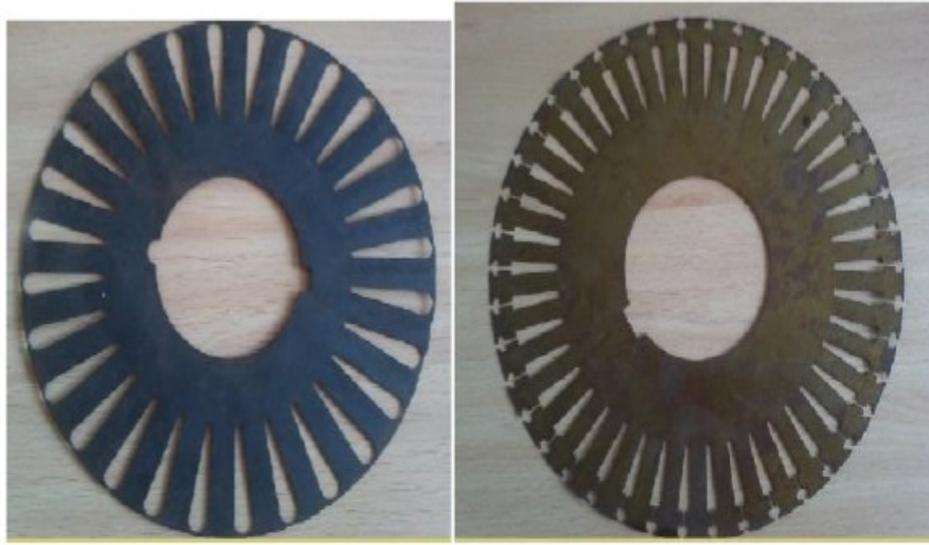
Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné, est d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue, et de loin, la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones en service.

Son inconvénient majeur est qu'il ne permet pas d'insérer un rhéostat, et qu'il a au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et couple faible) [9].

➤ **Le rotor à cage peut être**

- Un rotor à simple cage.
- Un rotor à double cage.
- Un rotor à encoches profondes.

Tôle utilisé pour la réalisation d'une cage à simple encoche figure a gauche et à double encoche figure a droit.



Figure

1-4 : Différentes structures de rotor à cage

### 1.2.3. Les paliers

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage [10].

### 1.3. Présentation des différents défauts de la machine asynchrone

Le diagnostic de l'état d'une machine n'est possible que si l'on connaît les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible d'affecter la machine considérée, c'est à dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts. La connaissance de ces images vibratoires et de la cinématique de la machine permet de formuler un diagnostic de l'état de la machine. Elles peuvent être électriques ou mécaniques. Ces défauts peuvent être classés selon les statistiques suivantes [11].

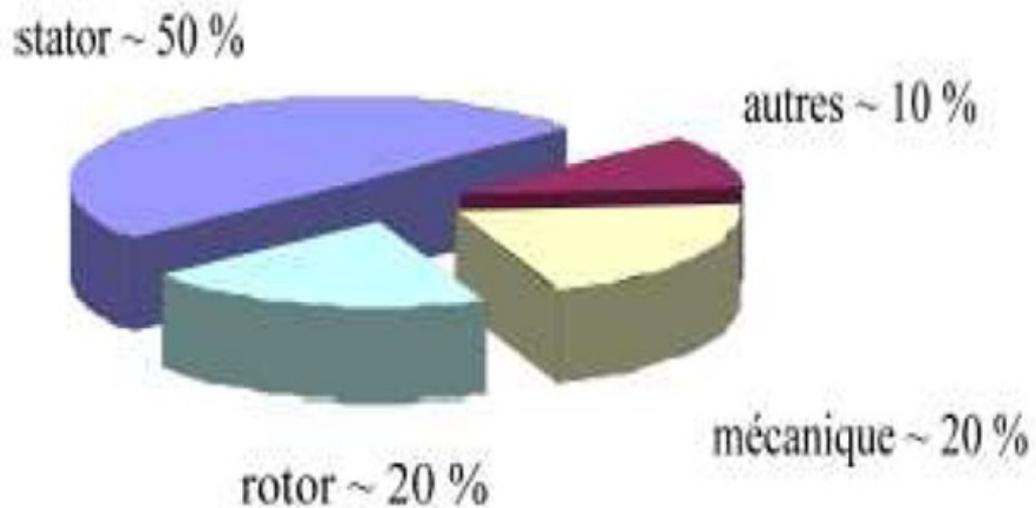


Figure 1-5: Répartition des pannes

#### 1.4. Les causes des défauts [12]

Pour le stator, les effets sont principalement dus à un problème :

- Thermique (surcharge).
- Électrique (diélectrique).
- Mécanique (bobinage).
- Environnemental (agression).

Pour le rotor, les effets sont essentiellement dus à un problème :

- Thermique (surcharge).
- Électromagnétique (Force en fonction  $B^2(t)$ ).
- Résiduel (déformation).
- Dynamique (arbre de transmission).
- Mécanique (roulement).
- Environnemental (agression).

##### 1.4.1. Défauts statorique

Ces défauts apparaissent souvent au niveau des enroulements statoriques (Fig 1-7) et sont dus à des dépassements de différentes natures [13]. On distingue :

- Court-circuit dans les spires d'une même phase.
- Court-circuit entre phases ou entre bobines.

- Coupure d'une phase.
- Défaut du circuit magnétique (rupture de tôles).
- Défaut de l'isolation masse.

A partir des études théoriques, il a été montré que le courant statorique avait un spectre enrichi par la création d'un court circuit au stator [14].

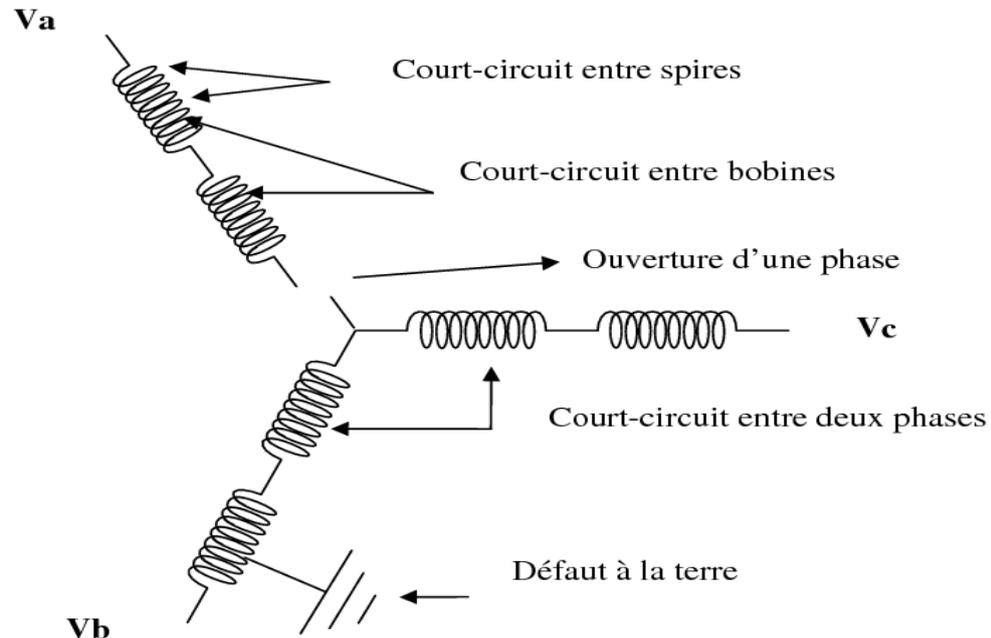


Figure 1-6: Défauts statorique

## 1.4.2. Défauts rotorique

### 1.4.2.1. Rupture de barre

Les cassures de barres sont les défauts les plus fréquents au niveau du rotor, elles se présentent par des ruptures totales ou partielles d'une ou plusieurs barres de la cage. Ces défauts se traduisent par une augmentation de la résistance équivalente d'un enroulement rotorique. La rupture d'une barre peut être due à plusieurs phénomènes qui sont souvent indépendants les uns des autres. Nous pouvons citer par exemple une mauvaise utilisation de la machine (charge trop importante) ou encore l'environnement hostile dans lequel elle fonctionne [15] [16]. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et [17] augmente l'hétérogénéité électrique et magnétique qui se traduisent par des oscillations engendrant des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine.

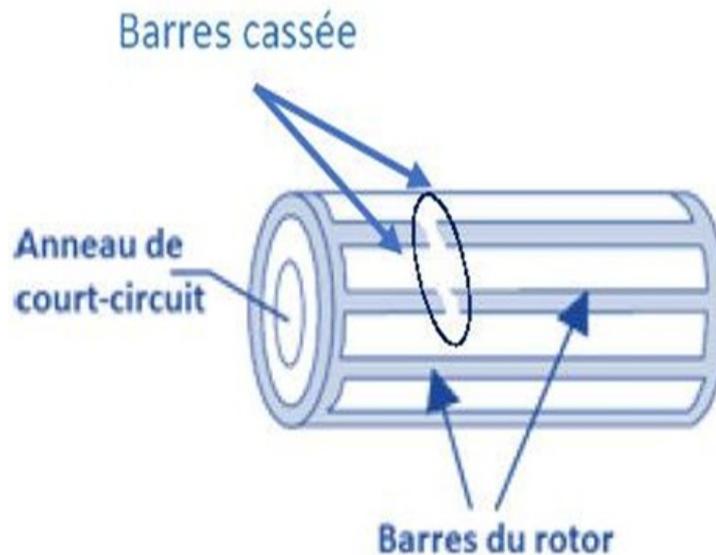


Figure 1-7: Rupture de barre

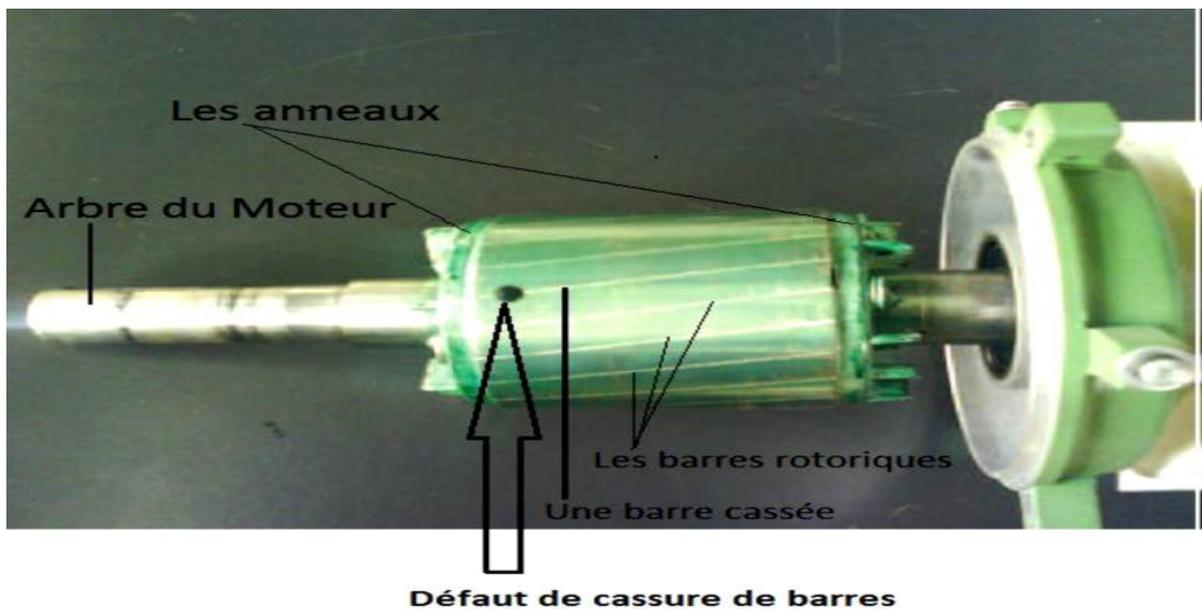


Figure 1-8: Défaut cassure de barres dans le rotor à cage d'écureuil

#### 1.4.2.2. Ruptures de portions d'anneaux de court-circuit [18]

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux.

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait un mauvais dimensionnement des

anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

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

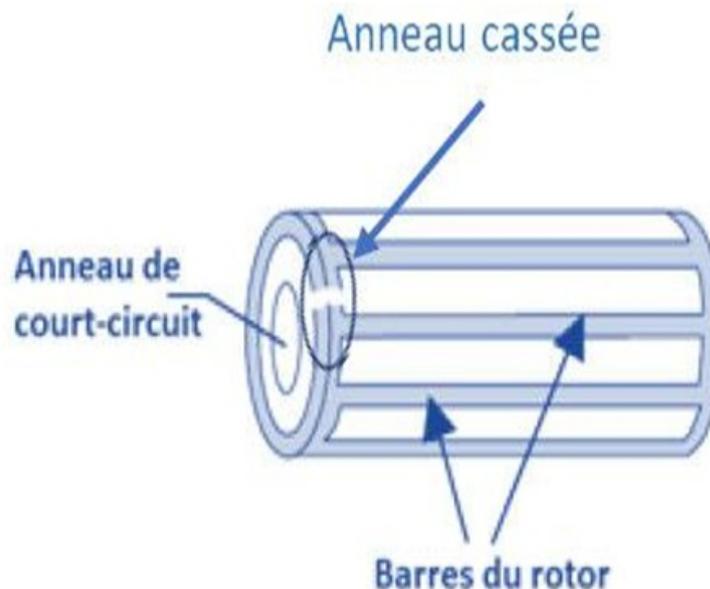


Figure 1-9: Rupture de d'anneaux

portions

### 1.4.2.3. d'excentricité

Les être statiques, Il s'agit d'un du rotor par peut avoir

positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, un défaut de roulement (usure), un défaut de charge, ou un défaut de fabrication. L'excentricité statique de l'entrefer correspond au cas où le centre de rotation de l'arbre du rotor n'est pas celui du centre géométrique du stator. L'excentricité dynamique, correspond au cas où le centre du rotor diffère du centre géométrique du stator, de plus le centre du rotor tourne autour du centre géométrique du stator. L'excentricité mixte est la combinaison des deux cas présentés précédemment [19] [20]. On peut présenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante ; Figure (1-10)

### Défauts

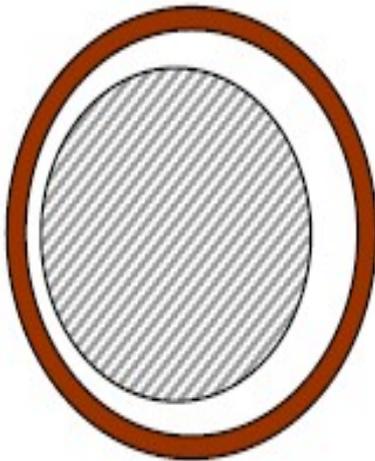
excentricités peuvent dynamiques ou mixtes. mauvais positionnement rapport au stator qui pour origine un

Ce défaut modifie le comportement magnétique et 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 peut engendrer une dégradation de son isolant.

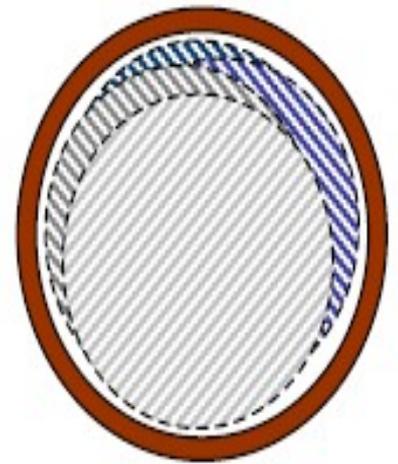
Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer à savoir :

- L'excentricité statique : lorsque l'axe du stator coïncide avec l'axe de rotation et non avec l'axe de rotation.
- L'excentricité dynamique : lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide pas avec l'axe de symétrie du stator.

- L'excentricité mixte : lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide pas avec les axes de symétrie du rotor et du stator.



Excentricité statique



Excentricité dynamique

Figure 1-10: Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique

#### 1.4.2.4. Défauts des roulements

Le roulement est l'élément le plus critique d'une machine. Il joue le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor, il permet aussi de maintenir l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor avec un frottement minimal. La fréquence qui caractérise le défaut de roulement dépend du type de défaut et de la géométrie de roulement [21]. Il ya plusieurs paramètres comme :

- contamination du roulement par des particules.
- corrosion engendrée par la pénétration d'eau.
- mauvais alignement du rotor.
- courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques.

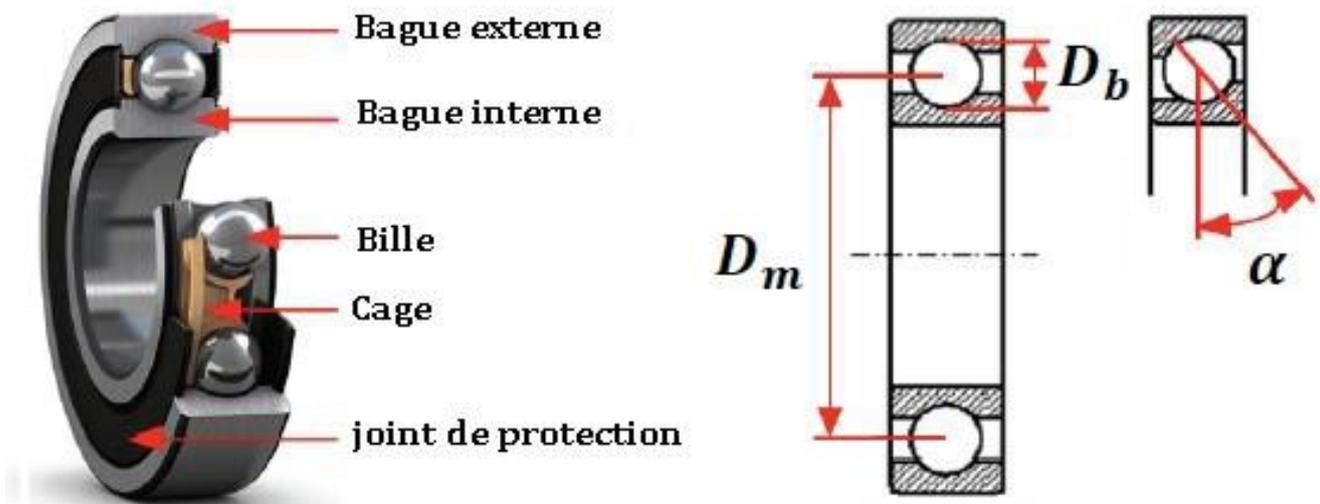


Figure 1-11: Dimensions du roulement à bille

**$D_m$** : Diamètre moyen du roulement.

**$D_b$** : Diamètre d une bille.

**$\alpha$**  : Angle de contact de la bille avec les bagues.

**$N$**  : Nombre de billes.

### 1.5. 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 de la machine [22] :

On cite parmi les conséquences des défauts :

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

## 1.6. Conclusion

Ce chapitre est consacré pour la présentation et l'étude des différentes parties constituant la machine asynchrone triphasée plus précisément celle à cage d'écureuil, à savoir (stator, rotor, paliers), nous sommes intéressés ensuite à synthétiser les défauts mécaniques et électriques qui se produisent au niveau de la machine. Les différents éléments qui le constituent peuvent être soumis à des dégradations diverses. Ceci nous aidera à orienter notre travail dans les chapitres qui suivront vers la détection des défauts les plus courants et les plus virulents qui peuvent paralyser la chaîne de production.

# Chapitre 02

## PERFORMANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE SANS DÉFAUTS

---

### 2.1. Introduction

Dans ce chapitre-II le logiciel utilisé est ANSYS Maxwell, ce dernier est utilisé pour créer la géométrie et étudier les performances de la machine asynchrone à cage d'écureuil 5.5KW machine saine.

Il s'agit du logiciel «Maxwell2D», leader dans la simulation de phénomènes électromagnétiques par la méthode des éléments finis.

Il s'agit d'un logiciel de simulation par éléments finis qui prend en compte la puissance des phénomènes magnétiques et thermiques et permet des régimes transitoires. Il s'agit donc d'un logiciel parfaitement adapté aux besoins de l'étude des machines électriques.

Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs à symétrie bidimensionnelle ou tournante comprenant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non linéaires, isotropes ou non. C'est un logiciel complet qui présente l'avantage de permettre le couplage avec les équations du circuit ainsi que l'ajout d'une zone de surface déterminée appelée "bande de roulement" pour l'étude de machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans besoin de modification géométrie et maillage. Sur la base d'une spécification spécifique, il vérifie automatiquement toutes les solutions possibles.

### 2.2. ANSYS Maxwell

#### 2.2.1. Editeur du logiciel

**John A. Swanson** est un ingénieur, entrepreneur et philanthrope américain. Il est le fondateur de la société ANSYS créée en 1970, il a reçu la médaille John Fritz et il est membre de l'académie nationale d'ingénierie américaine il est internationalement connu et considéré comme un des pionniers de la méthode des éléments finis dans l'ingénierie [23].

### 2.2.2. Présentation du 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, vous pouvez caractériser avec précision le mouvement transitoire non linéaire des composants électromécaniques et leurs effets sur la conception du circuit d'entraînement et du système de commande.

Grace aux solveurs des champs électromagnétiques avancés de Maxwell reliés aux outils de simulation de circuits intégrés et de systèmes, vous pouvez comprendre la performance 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 de la performance du système [24].

### 2.2.3. RMXprt

Est un outil ajouté au logiciel Maxwell pour faciliter son utilisation par des exemples et plusieurs modèles prédéfinies dans une sorte de bibliothèque ou on peu trouvé des géométries similaire a celle souhaité dont il se fait juste d'apporté les modifications qu'il faut (les paramètres de la machine, le type de la géométrie), ce qui nous permettras de requiert pas male de temps [25].

## 2.3. Etapes de la conception sur le module RMXprt

La construction du modèle pour un moteur, commence par choisir le type de machine, puis spécifier les paramètres du moteur via RMXprt.

Ensuite, l'utilisateur commence à définir la géométrie dimensions de la machine, puis définition des propriétés du matériau.

La fenêtre de sélection de machine de la figure (2-1) inclut toutes les machines tournantes AC et DC possibles dans l'ordinateur central Maxwell RMXprt, chaque machine ayant ses propres dimensions et propriétés mécaniques prédéfinies.

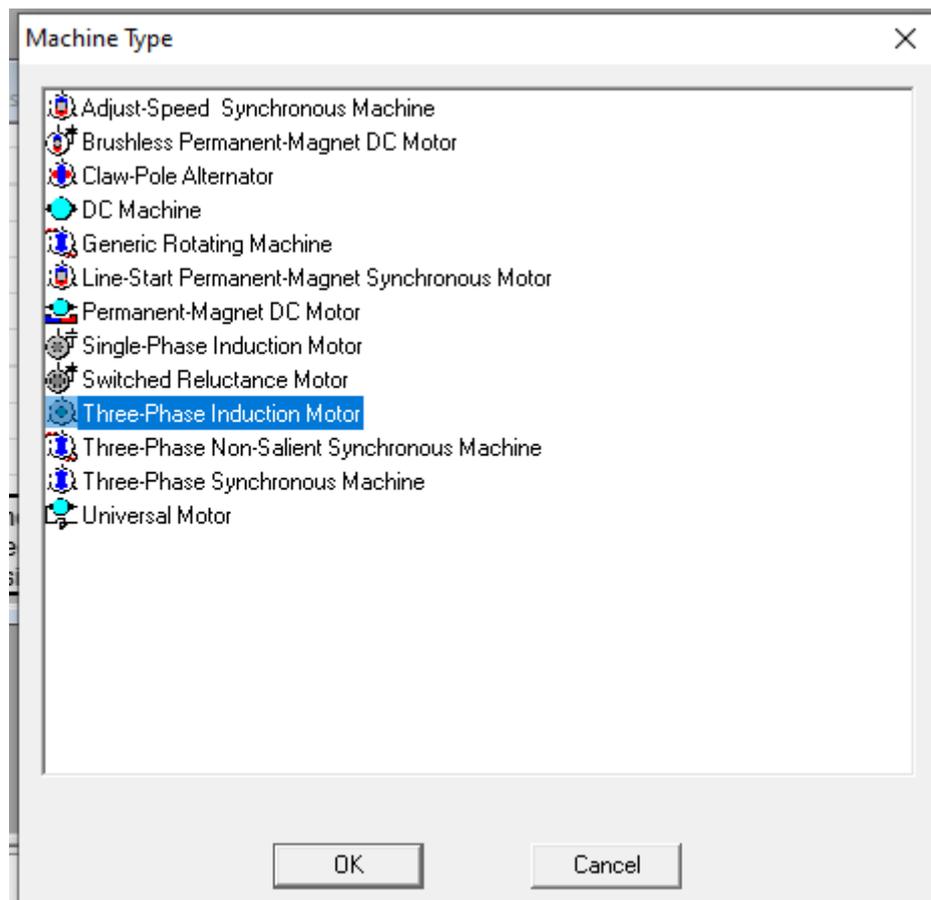


Figure 2-12 : Interface de sélection du type de la machine

La fenêtre de projet de la **figure 2-2** comprend une liste d'outils déroulante

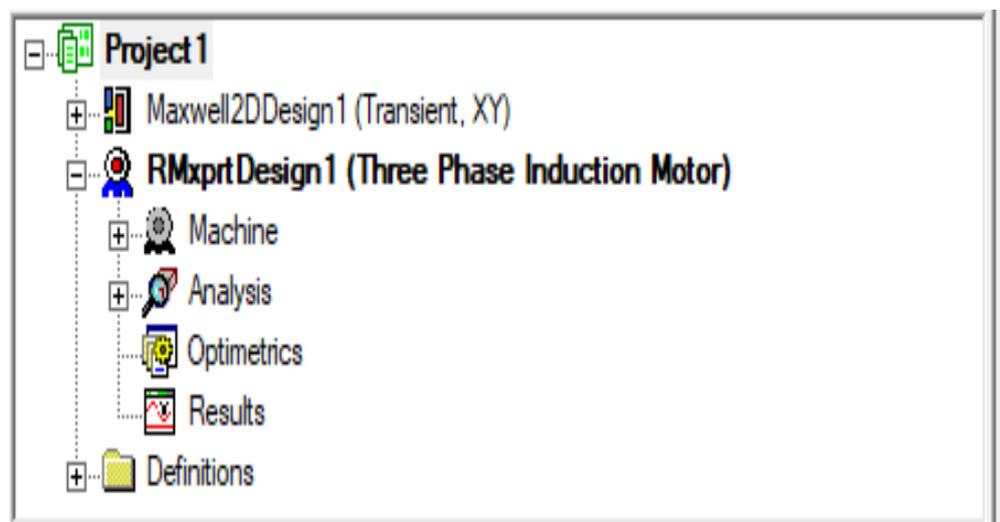


Figure 2-13 : Fenêtre du gestionnaire de projet

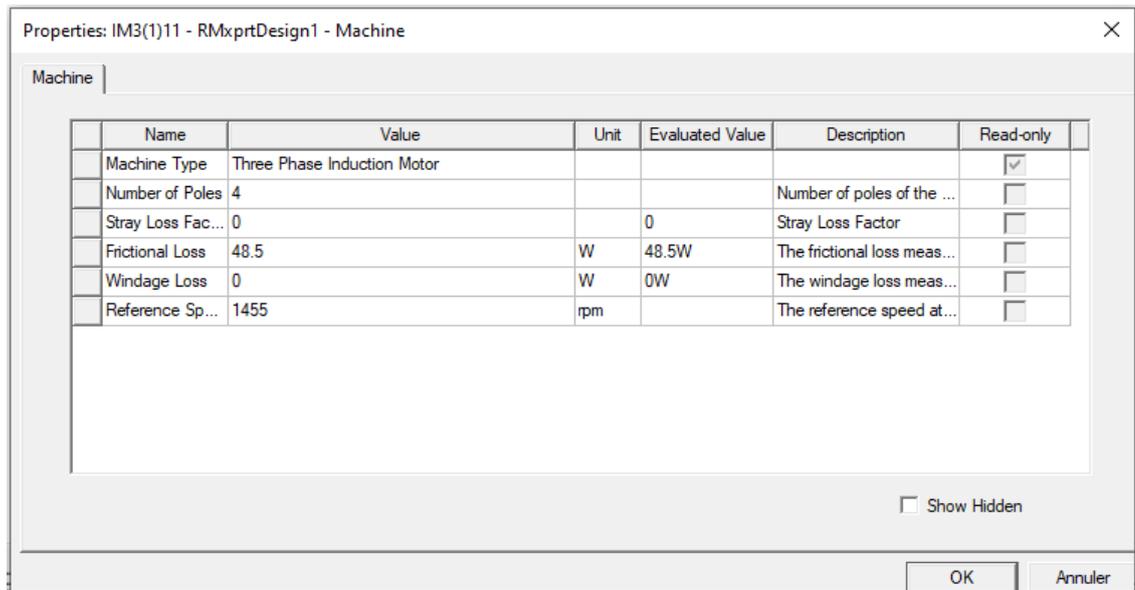


Figure 2-14 : les propriétés de la machine asynchrone

### 2.3.1. Dimensions générales du stator

Le stator est un ensemble de couches crantées dans lesquelles se trouvent des bobines. Les diamètres interne et externe ainsi que la longueur et le nombre d'encoches de stator varient selon le type de moteur modélisé. Les principales dimensions des machines fournies par le fabricant EI seront introduites dans le modèle RMXprt choisi.

Le **Figure (2-4)** montre les paramètres, dimensions principales du stator de la machine asynchrone avec le matériau magnétique.

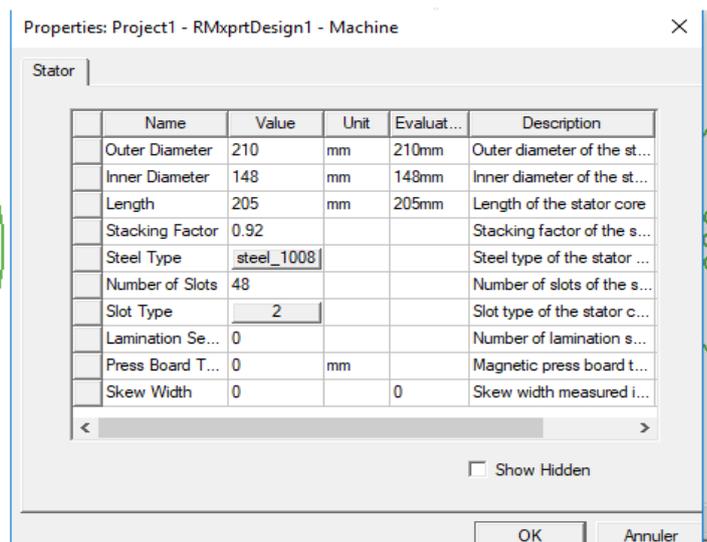
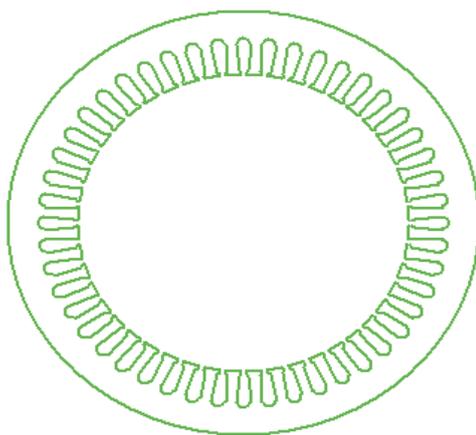


Figure 2-15 : Dimensions principales du stator

### 2.3.2. Dimensions principales de l'encoche statorique

La Figure (2-5) suivante représente la géométrie de l'encoche statorique de machine asynchrone 5.5KW selon la géométrie donnée dans la deuxième partie.

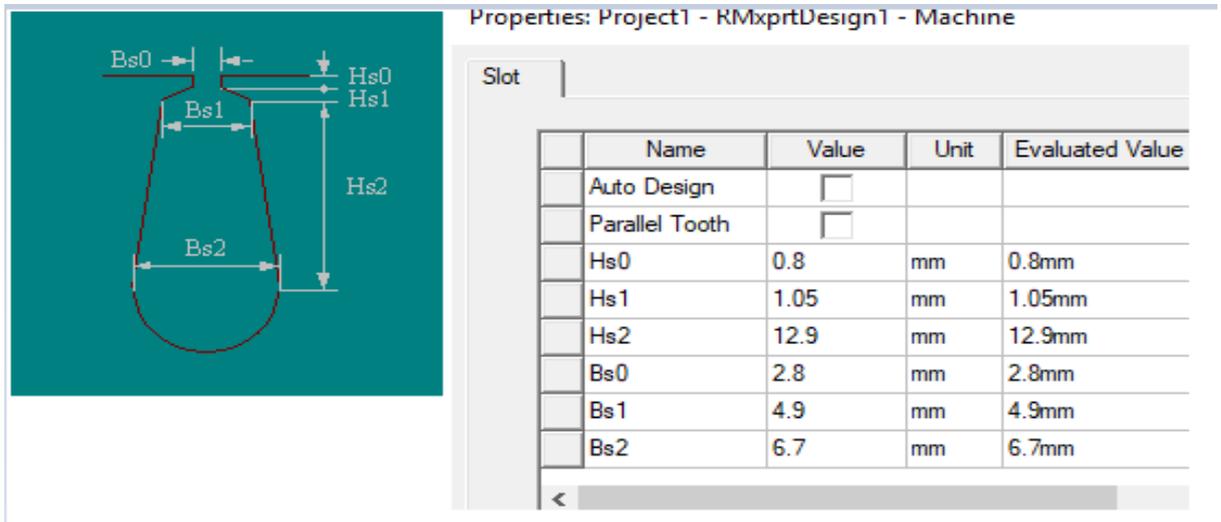


Figure 2-16: Dimension des encoches statorique

### 2.3.3. Dimensions principales du rotor

Le module RMxprt offre l'avantage d'utiliser un rotor à cage avec des types d'encoches personnalisables qui répond parfaitement à nos besoins.

La cage de démarrage est en aluminium.

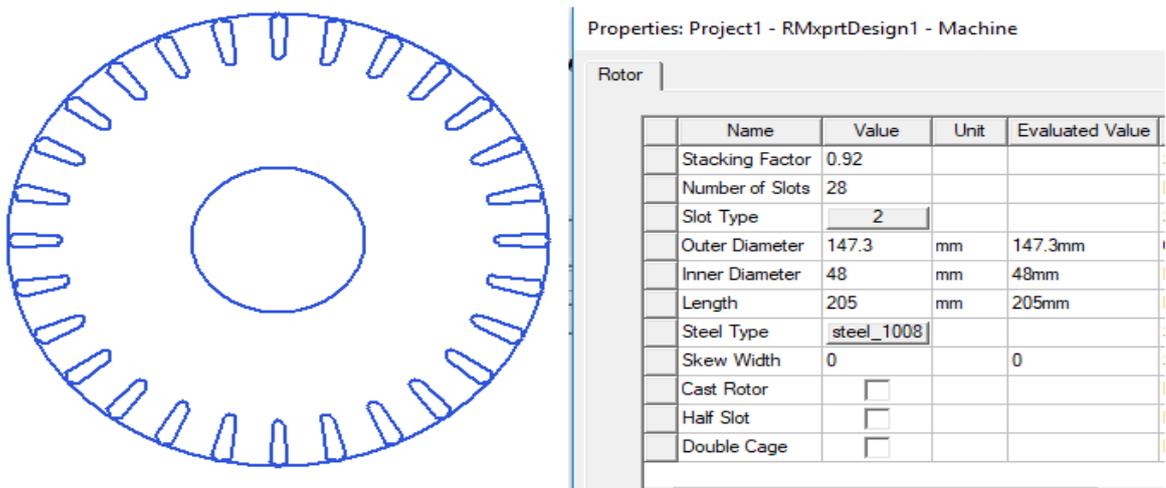


Figure 2-17 : Dimensions principales du rotor

### 2.3.4. Dimensions de l'encoche rotorique

La Figure (2-7) représente les modèles d'encoches prédéfinis par RMXprt pour créer les formes exactes des encoches des cages de démarrage et celle du travail.

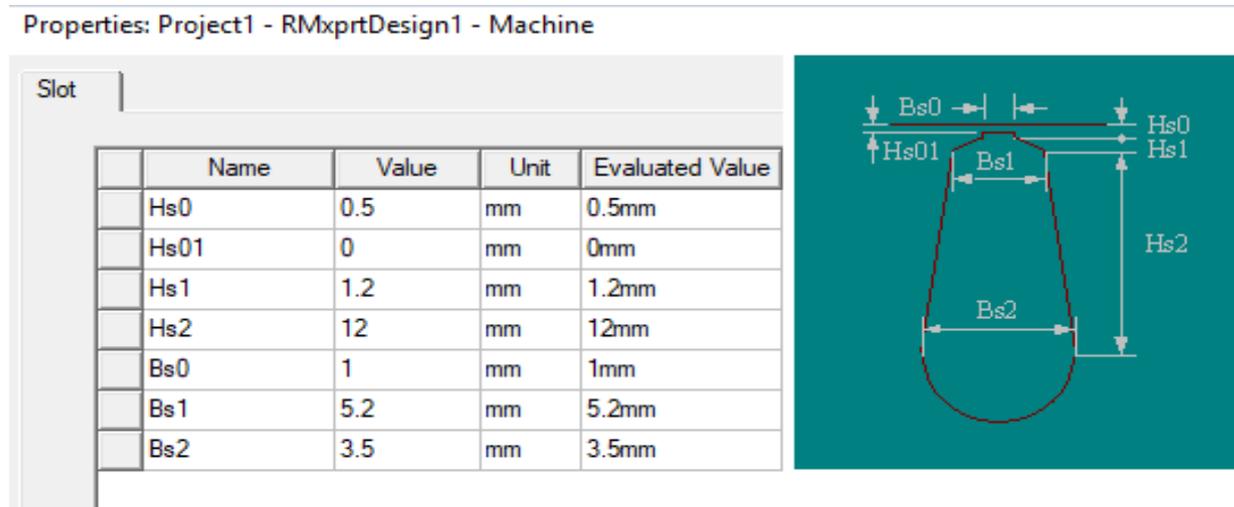


Figure 2-18 : Forme d'encoche standard utilisée pour créer l'encoche de la cage

### 2.3.5. Configuration du bobinage

Le module RMXprt permet de définir le type de bobinage utilisé dans le stator selon certaines configurations prédéfinies et souvent utilisées dans les machines électriques. Dans notre cas le bobinage utilisé dans la machine de 5.5kW n'est pas préconfiguré dans le logiciel. A cet effet nous avons introduit notre configuration du bobinage manuellement conformément à distribution donnée par constructeur.

Les figures (2-8, 2-9) montrent la distribution des bobines de la phase A sur l'ensemble des encoches statoriques ainsi que les paramètres de bobinage.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	
Winding L...	2			
Winding T...	Wh...			
Parallel Br...	2			
Conductor...	30		30	
Coil Pitch	11			
Number of...	2		2	

Winding End/Insulation

	Phase	Turns	In Slot	Out Slot
Coil_1	A	15	1T	12B
Coil_2	A	15	2T	13B
Coil_3	A	15	3T	14B
Coil_4	A	15	4T	15B
Coil_5	-C	15	5T	16B
Coil_6	-C	15	6T	17B
Coil_7	-C	15	7T	18B
Coil_8	-C	15	8T	19B
Coil_9	B	15	9T	20B
Coil_10	B	15	10T	21B
Coil_11	B	15	11T	22B
Coil_12	B	15	12T	23B

Figure 2-19: Paramètres et distribution de l'enroulement de la phase A

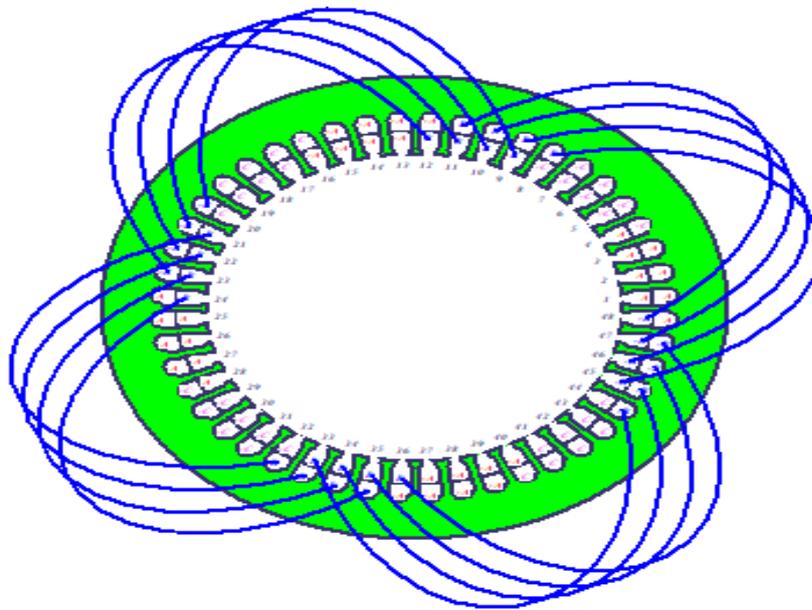


Figure 2-20 : Distribution du bobinage statorique (phase A)

### 2.3.6. Choix des matériaux

Les figures (2-10 à 2- 12) montrent les différents matériaux utilisés dans la conception du modèle de la machine pour le circuit magnétique à cage.

aluminum\_no2\_EC

Properties of the Material

Name	Type	Value	Units
Relative Permeability	Simple	1.000021	
Bulk Conductivity	Simple	33000000	siemens/m
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	0	A_per_meter
Core Loss Type		None	w/m^3
Mass Density	Simple	0	kg/m^3

Figure 2-21 : Propriétés électrotechniques du matériau utilisé pour la cage

steel\_1008

Properties of the Material

Name	Type	Value	Units
Relative Permeability	Nonlinear	B-H Curve...	
Bulk Conductivity	Simple	2000000	siemens/m
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	0	A_per_meter
Core Loss Type		None	w/m^3
Mass Density	Simple	7872	kg/m^3

Figure 2-22 : Propriétés électrotechniques du matériau utilisé dans le circuit magnétique

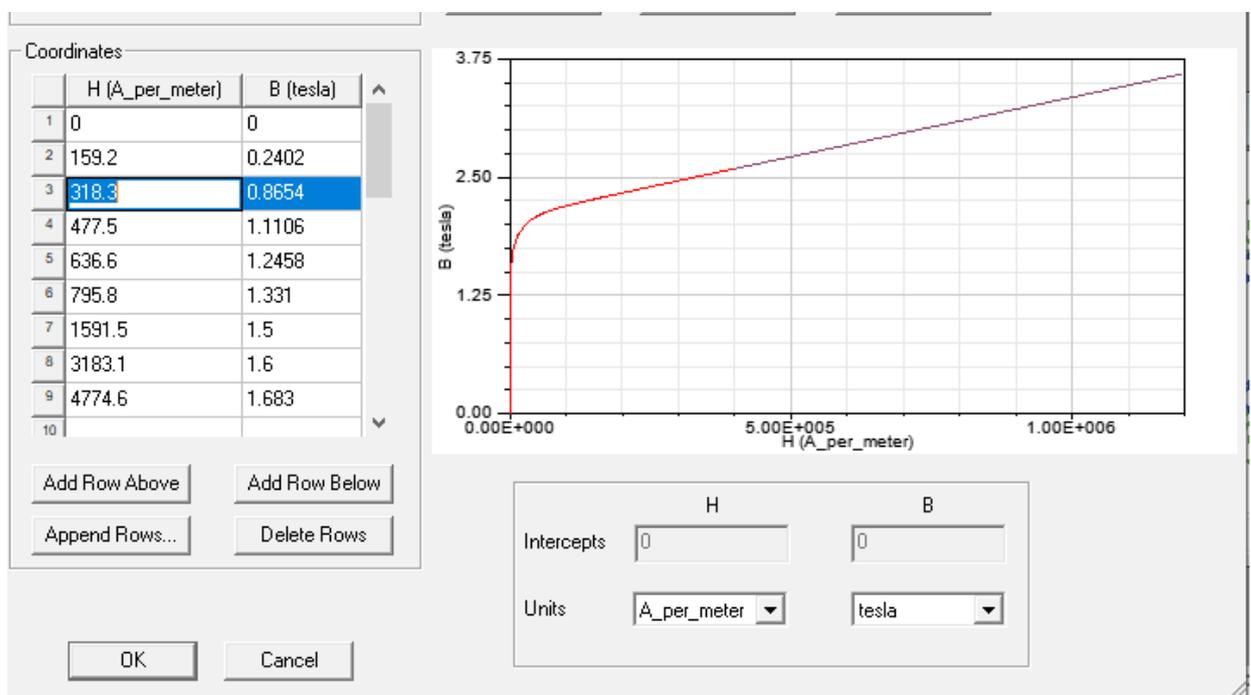


Figure 2-23 : courbe de B(H)

## 2.4. Validation du modèle et exportation des résultats

Nous représentons dans la suite des résultats de calcul analytiques des différents paramètres de la machines. Les résultats seront regroupés dans des tableaux selon la nature des données.

### 2.4.1. Paramètre nominaux

Le **tableau (1)** représente les paramètres nominaux de la machine asynchrone à cage de 5.5kW.

Paramètre nominaux	Valeur numérique	Unité de mesure
Puissance nominale	5.5	<b>KW</b>
Tension	400	<b>V</b>
Connexion des enroulements	<i>Wye</i>	/
Nombre de pôles	4	/
Vitesse nominale	1455	<b>tr/min</b>
Fréquence d'alimentation	50	<b>Hz</b>
Température de fonctionnement	75	<b>C</b>
<i>Intensité nominale</i>	10.5	<b>A</b>
Nombre de paires de pôles	2	/
Couple nominale	35	<b>N.m</b>
Couplage	Etoile	/

Tableau 1 : Paramètres de la machine

### 2.4.2. Fonctionnement nominal

Pour vérifier les conditions normales et extrêmes de fonctionnement, le logiciel RMXprt permet d'effectuer des essais sur le modèle analytique de la machine pour fonctionnements à vide, au décrochage et à rotor bloqué. Les tableaux (2, 3, 4 et 5) représentent les différents résultats obtenus.

Fonctionnement nominal	Valeur numérique	Unité de mesure
------------------------	------------------	-----------------

Resistance du Stator	0.62955	$\Omega$
Resistance du Stator à 20C	0.517856	$\Omega$
Réactance de fuite du Stator	0.723859	$\Omega$
Resistance du Rotor	0.699336	$\Omega$
Resistance du Rotor à 20C	0.575261	$\Omega$
Réactance de fuite du rotor	1.72492	$\Omega$
Resistance magnétisante	96.2972	$\Omega$
Réactance magnétisante	2.04114	$\Omega$
Courant dans la phase statorique	9.91197	A
Courant dans la résistance magnétisante	4.0671	A
Courant magnétisant	4.41169	A
Courant dans la phase rotorique	8.58647	A

Tableau 2 : Paramètres de la machine pour un fonctionnement nominal

Bilan de puissance	Valeur numérique	Unité de mesure
Perte de cuivre de l'enroulement du stator	185.565	W
Perte de cuivre de l'enroulement du rotor	154.679	W
Perte de noyau de fer	0.00516857	W
Perte de frottement et de vent	48,644	W
Pertes totales	388.891	W
Puissance consommée	5.88922	KW
Puissance utile	5.50033	KW
Couple d'arbre mécanique	35.9923	N.m
Rendement	93.966	%
Facteur de puissance	0.857567	/
Glissement nominal	0.0271193	/
Vitesse de rotation nominale	1459.34	Tr/min

Tableau 3 : Bilan de puissance pour un fonctionnement nominal

### 2.4.3. Fonctionnement à vide

Fonctionnement à vide	Valeur numérique	Unité de mesure
Resistance à vide	0.62955	$\Omega$
Réactance de fuite à vide	0.724851	$\Omega$
Resistance rotorique	0.6993	$\Omega$
Réactance de fuite rotorique	1.73603	$\Omega$
Courant de phase	4.52522	A
Pertes à vide	0.00539742	W
Puissance consommée	87.235	W
Facteur de puissance	0.0278247	/
Glissement	0.00021849	/
Vitesse à vide	1499.67	Tr/min

Tableau 4: Paramètres de la machine pour un fonctionnement à vide

### 2.4.4. Fonctionnement avec rotor bloqué

Fonctionnement à rotor bloquée	Valeur numérique	Unité de mesure
Couple à rotor bloquée	177.966	<i>N.m</i>
Courant de phase rotorique	113.889	<i>A</i>
Rapport du couple	4.94449	/
Rapport du courant	11.4901	/
Resistance statorique	0.62955	$\Omega$
Réactance de fuite statorique	0.567691	$\Omega$
Résistance rotorique	0.747388	$\Omega$
Réactance de fuite rotorique	0.953271	$\Omega$

Tableau 5 : Paramètres de la machine pour un fonctionnement à rotor bloqué

### 2.4.5. Paramètres électriques et magnétiques

Pour un fonctionnement nominal. Le tableau (6) représente les valeurs des paramètres électriques et magnétiques.

Paramètres électriques et magnétiques	Valeur numérique	Unité de mesure
Réactance de fuite de l'encoche Statorique	0.428102	$\Omega$
Réactance de fuite des têtes des bobines	0.112529	$\Omega$
Réactance de fuite des encoches rotoriques	0.747283	$\Omega$
Facteur d'enroulement statorique	0.949469	/
Densité du flux dans les dents statoriques	1.2062	<i>Tesla</i>
Densité du flux dans les dents rotoriques	0.985798	<i>Tesla</i>
Densité du flux dans le jauge statoriques	1.66373	<i>Tesla</i>
Densité du flux dans le jauge rotoriques	0.670435	<i>Tesla</i>
Densité du flux dans l'entrefer	0.570038	<i>Tesla</i>
Ampères-Tours dans les dents statoriques	8.87271	<i>A.T</i>
Ampères-Tours dans les dents rotoriques	5.461267	<i>A.T</i>
Ampères-Tours dans le jauge statoriques	106.775	<i>A.T</i>
Ampères-Tours dans le jauge rotorique	6.11428	<i>A.T</i>
Ampères de virage à intervalle d'air	210.819	<i>A.T</i>
Facteur de Saturation dans les dents	1.068	/
Charge linéaire spécifique	34.943	<i>A/mm</i>

Tableau 6 : Paramètres électriques et magnétiques pour un fonctionnement nominal

### 2.4.6. Paramètres de simulation pour les modèles en 2D

En vue de réaliser le modèle de la simulation numérique de la machine sur le logiciel

Maxwell2D, certains paramètres doivent être exportés automatiquement du logiciel RMxprt. **Tableau (7)** regroupe les paramètres nécessaires pour le modèle 2D

Paramètres de simulation pour les modèles en 2D	Valeur numérique	Unité de mesure
<b>Paramètres de la phase statoriques</b>		
Nombre de tours	240	/
Branches parallèles	2	/
Terminal Resistance	0.62955	$\Omega$
Inductance de fuite d'extrémité	0.000358192	H
<b>Cage (Aluminium)</b>		
Paramètres des cages	Valeur numérique	Unité de mesure
Résistance annulaire équivalente	2.31709e-006	$\Omega$
Inductance annulaire équivalente	2.05419e-009	H
<b>Valeur du modèle 2D</b>		
Profondeur du modèle 2D	205	Mm
Moment d'inertie estimée	0.0739025	kg m <sup>2</sup>

Tableau 7 : Paramètres de simulation pour les modèles en 2D

## 2.5. Les caractéristiques statiques de la machine

Le logiciel RMxprt permet de tracer plusieurs caractéristiques statiques de la machine en fonction de la vitesse et du glissement.

Ces caractéristiques permettent de voir les différents points de fonctionnement du démarrage de la machine jusqu'au rotor bloqué. Nous allons présenter dans la suite les caractéristiques les plus significatives de la machine.

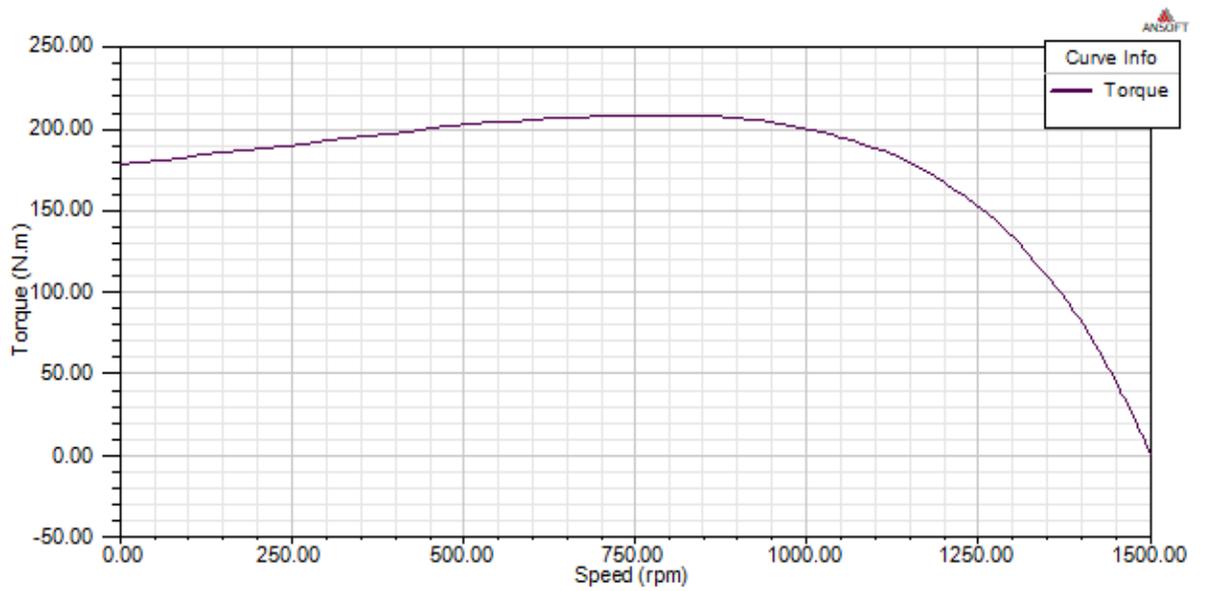


Figure 2-24: caractéristique couple-vitesse

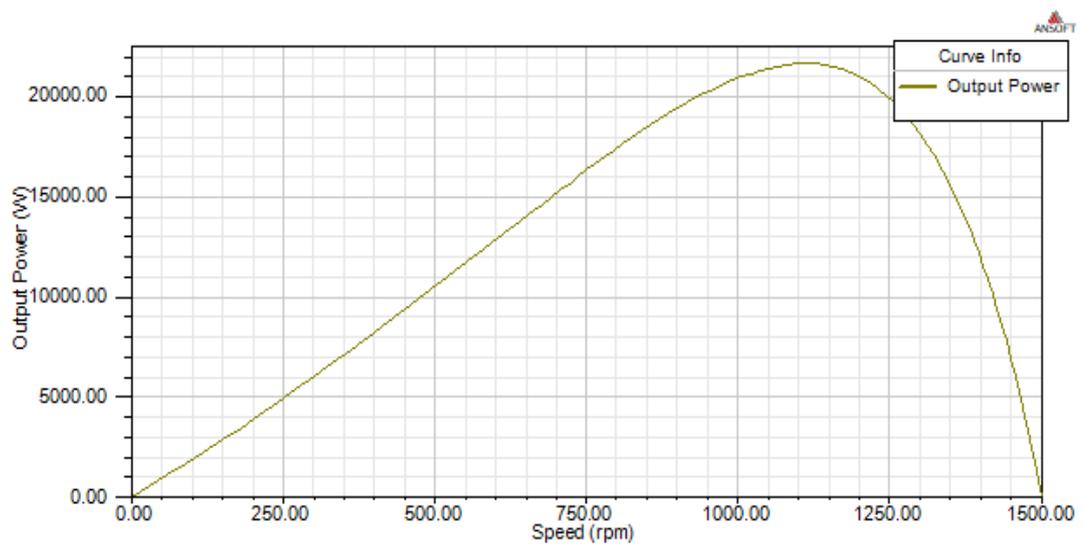


Figure 2-25: caractéristique puissance-vitesse

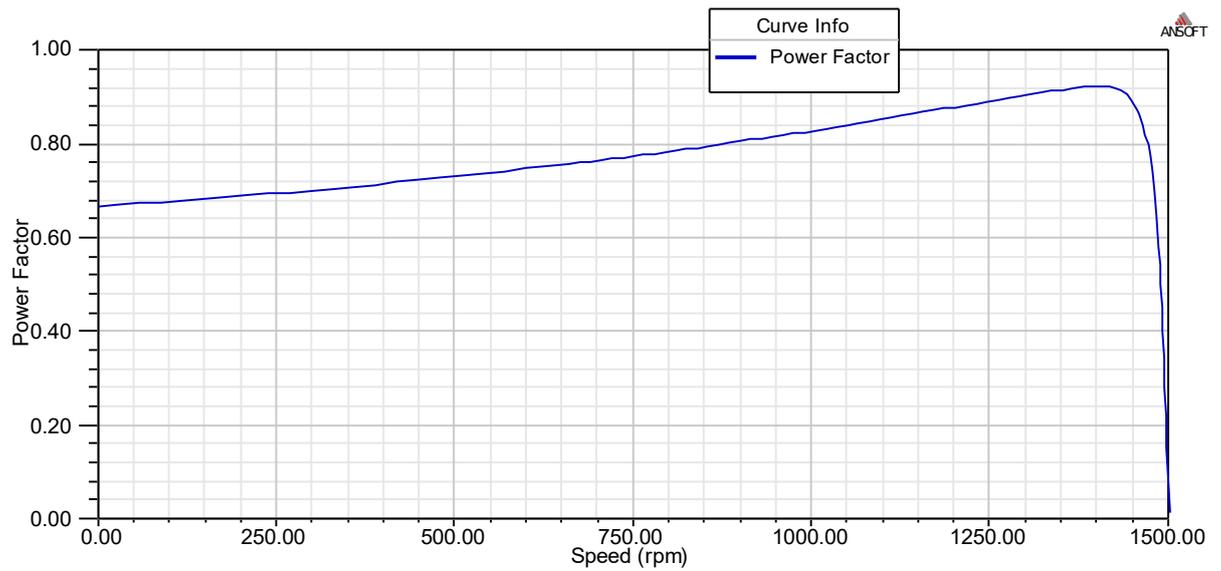


Figure 2-26 : caractéristique Facteur de puissance –vitesse

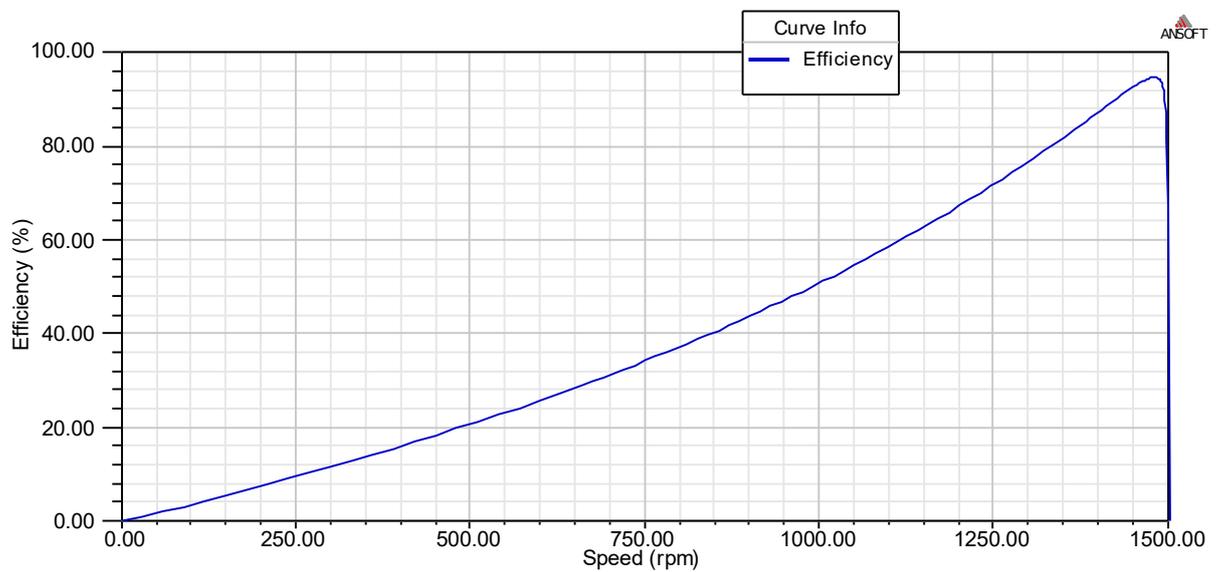


Figure 2-27: caractéristique rendement-vitesse

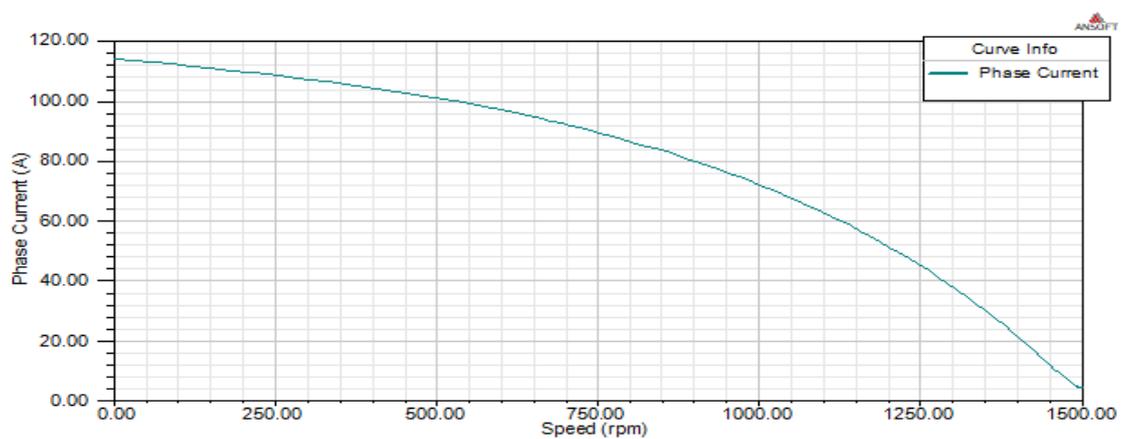


Figure 2-28 : caractéristique courant-vitesse

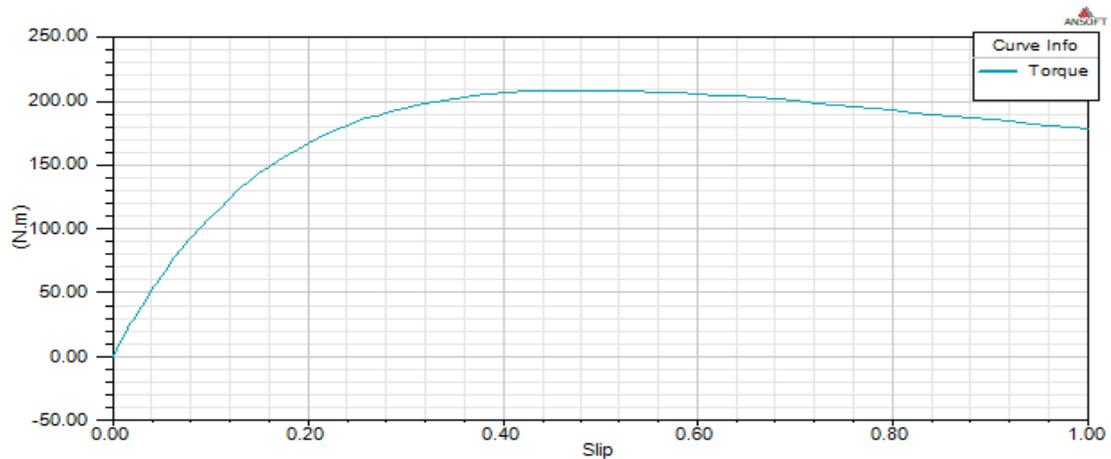


Figure 2-29 : caractéristique couple-glisserment

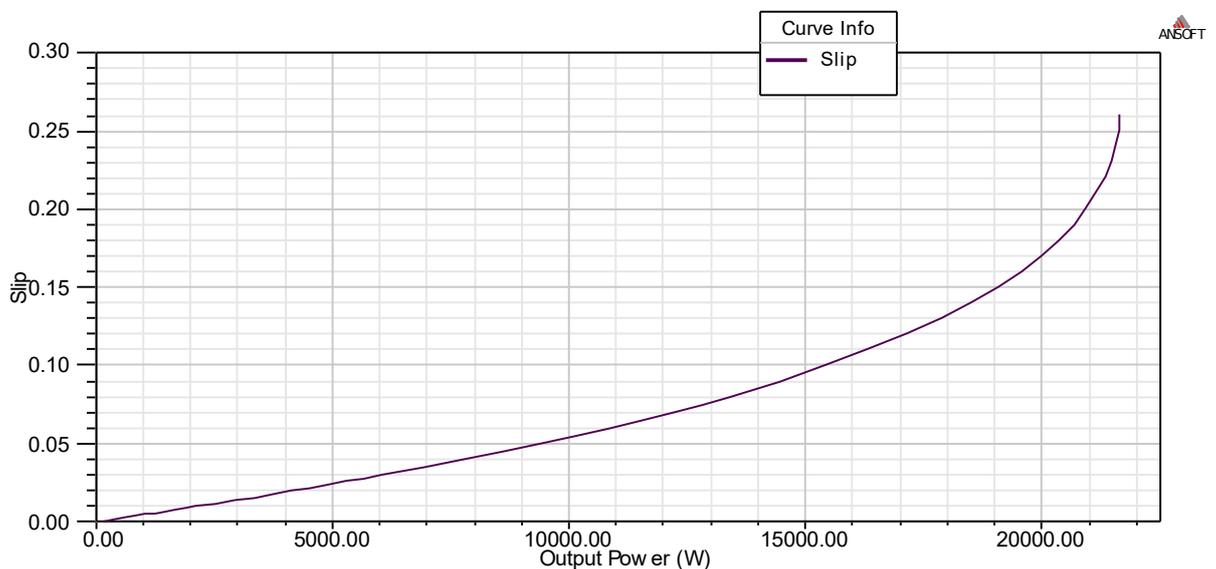


Figure 2-30: caractéristique glissement –puissance

## 2.6. Analyse des caractéristiques dynamiques de la Machine

Pour vérifier le comportement dynamique de la machine et voir les propriétés dynamiques, il faut à tout moment créer un modèle de simulation 2D pour calculer la distribution de l'induction magnétique. Ce modèle est possible avec le module de résolution numérique Maxwell2D.

ANSYS Maxwell2D est le logiciel de simulation des champs électromagnétiques. Il est utilisé pour la conception et l'analyse de moteurs électriques, d'actionneurs, de capteurs, de transformateurs et d'autres dispositifs électromagnétiques et électromécaniques. Maxwell caractérise le mouvement de transition non linéaire des composants électromécaniques et leurs effets sur la conception du circuit de commande et du système de commande. Les solveurs de champ électromagnétique ANSYS Maxwell aident à comprendre les performances des systèmes électromécaniques avant leur fabrication. Ce laboratoire virtuel offre un avantage concurrentiel important. Mise sur le marché plus rapide, coûts

réduits et meilleures performances du système. La réalisation d'un modèle analytique dans RMXprt permet la création directe d'un modèle de simulation 2D grâce à une fonction spéciale.

Le **Figure (2-20)** montre la géométrie de la machine asynchrone à cage dans l'environnement Maxwell2D.

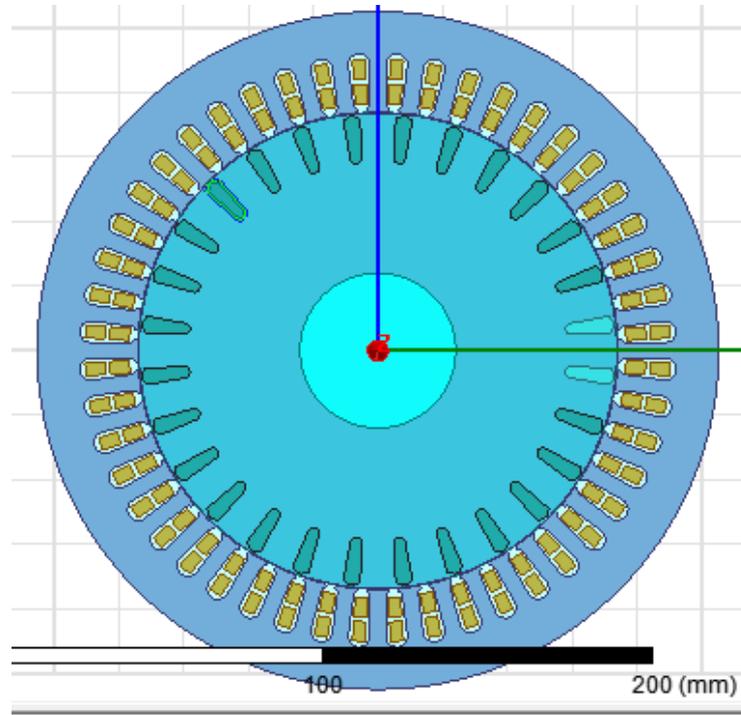


Figure 2-31 : Le modèle 2D de la machine asynchrone a cage

### 2.6.1. Validation du modèle 2D et exploitation des résultats

En fonction des résultats attendus et du temps de simulation disponible, nous utilisons le mode de simulation magnétique transitoire le plus complet. Il traduit avec précision la rotation du moteur et vous permet de trouver les pulsations de débit générées par les tiges cassées. Cependant, pour la machine étudiée, le réseau résultant, d'une part, et le nombre de périodes et pas de temps (notamment aux hautes fréquences), d'autre part, augmentent les temps de calcul. Cependant, il est intéressant de vérifier les résultats du calcul analytique.

### 2.6.2. Distribution de l'induction magnétique

Les **figures (2-21)** et **(2-22)** représentent respectivement la distribution de l'induction magnétique et la distribution des lignes du champ.

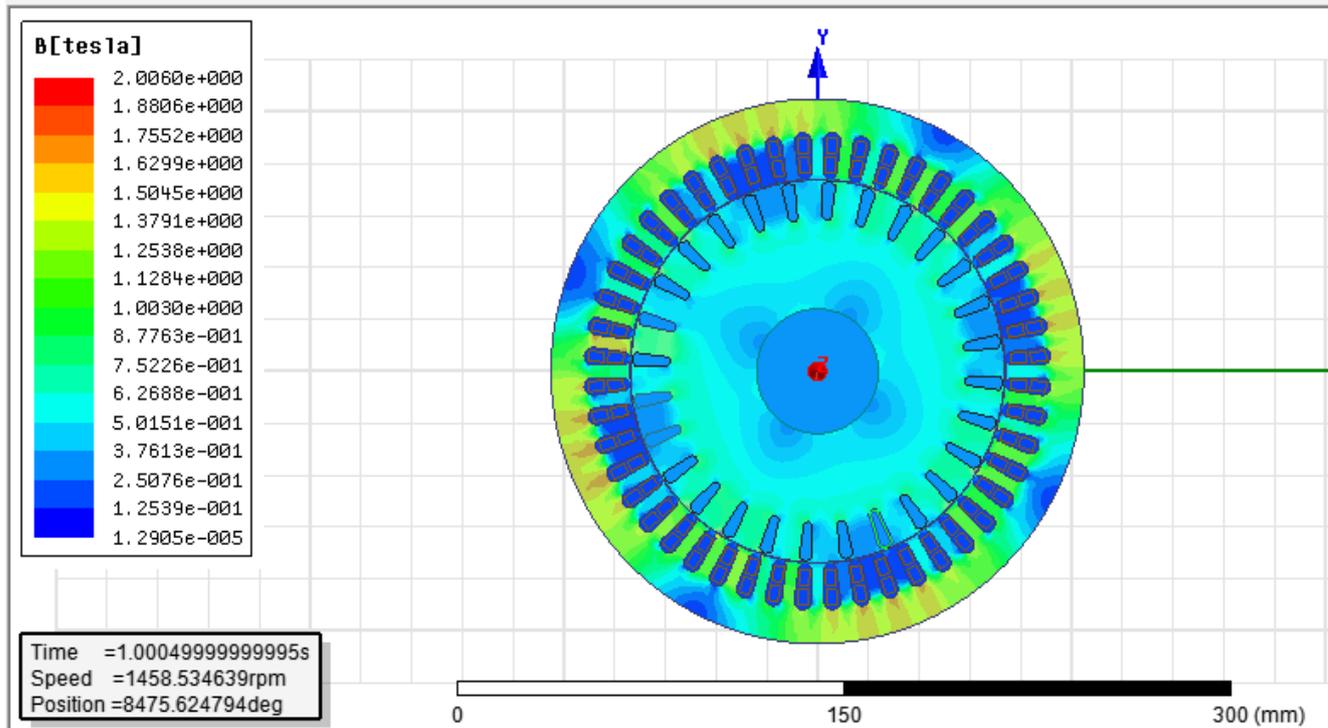


Figure 2-32 : Distribution de l'induction magnétique

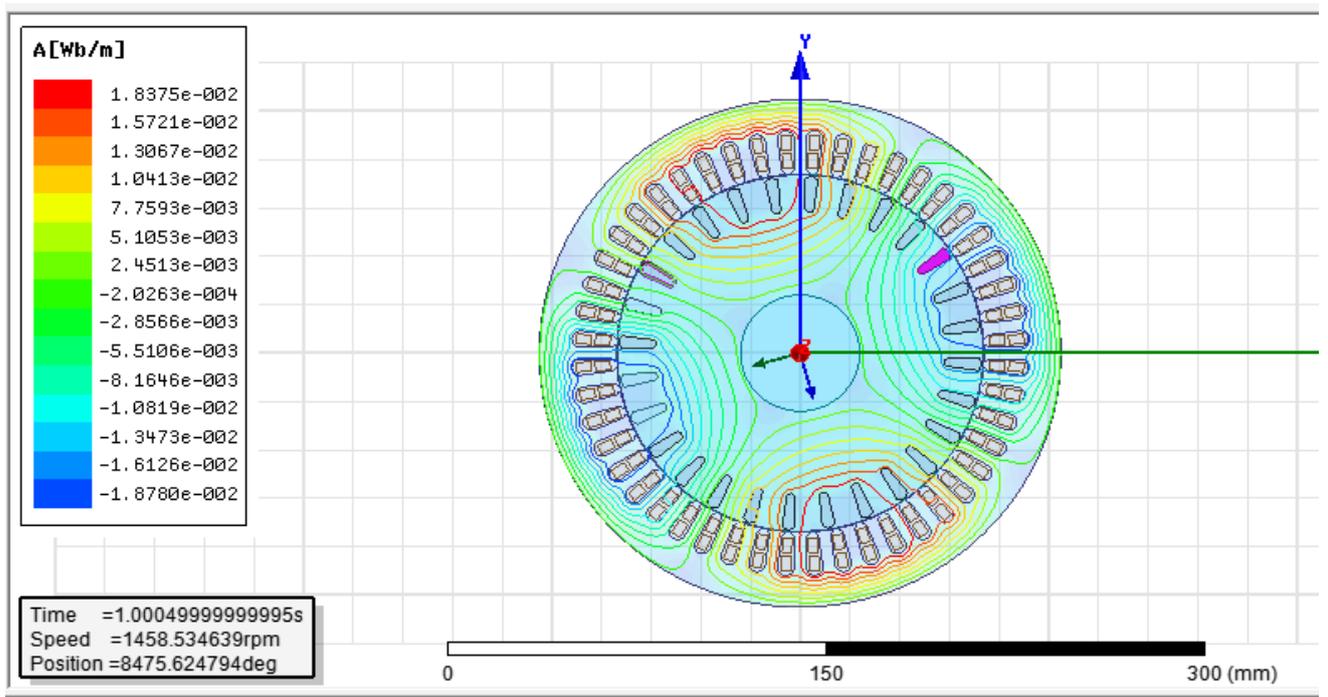


Figure 2-33 : Distribution des lignes du champ

2.6.3. Résultats de simulation pour la machine saine

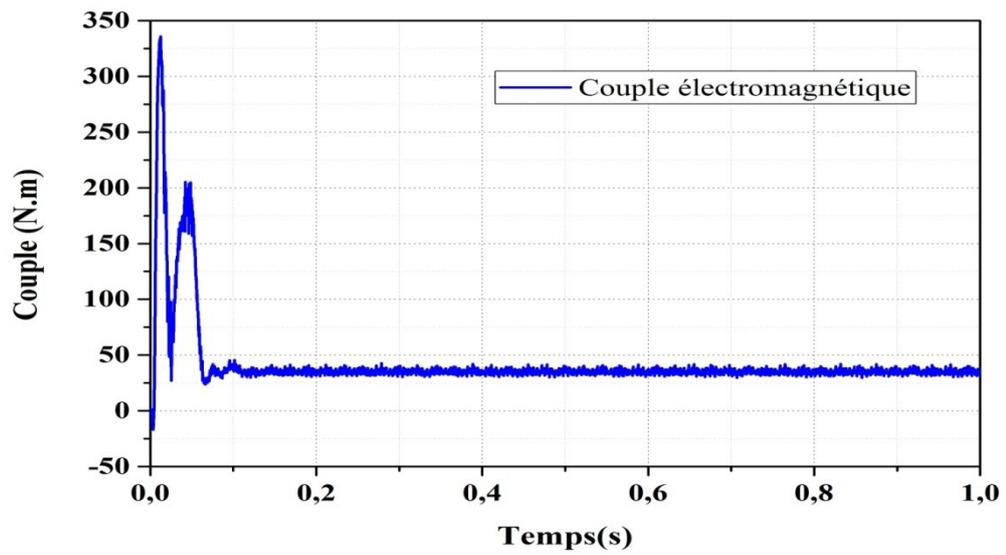


Figure 2-34 : Le couple électromagnétique

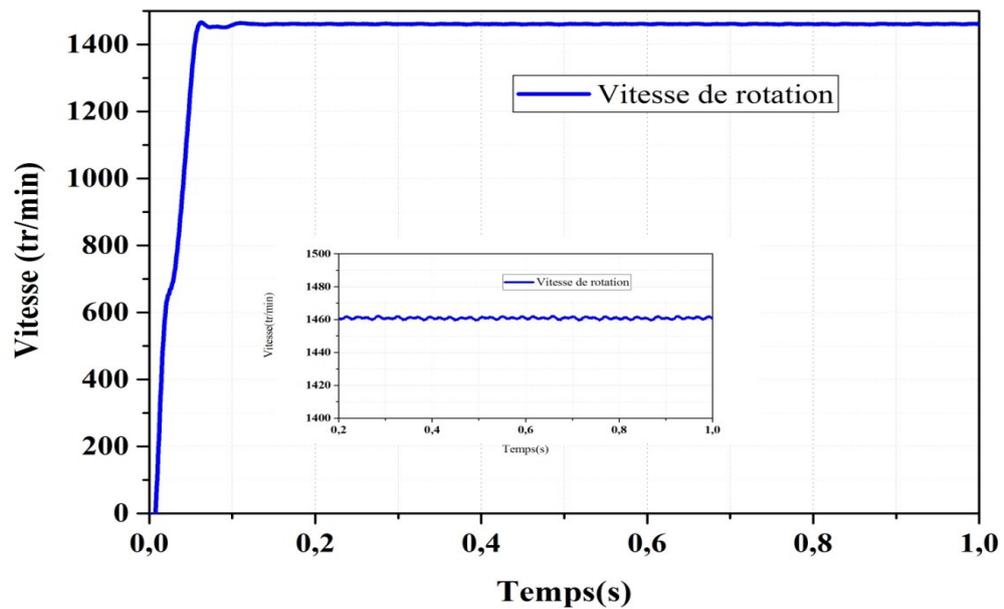


Figure 2-35: Allure de la vitesse de rotation

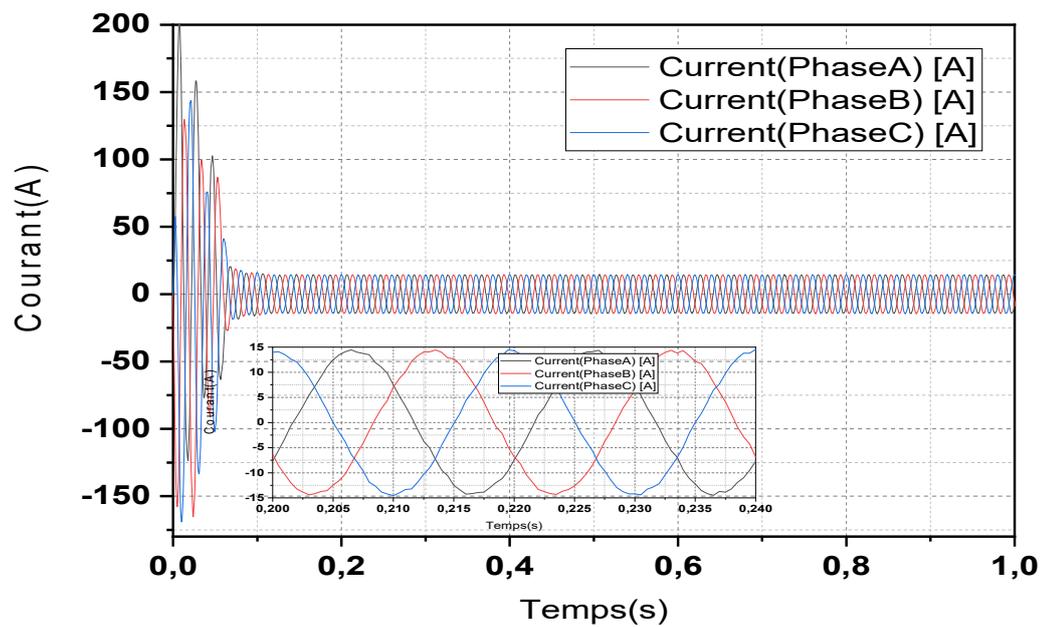


Figure 2-36 : Courant statorique

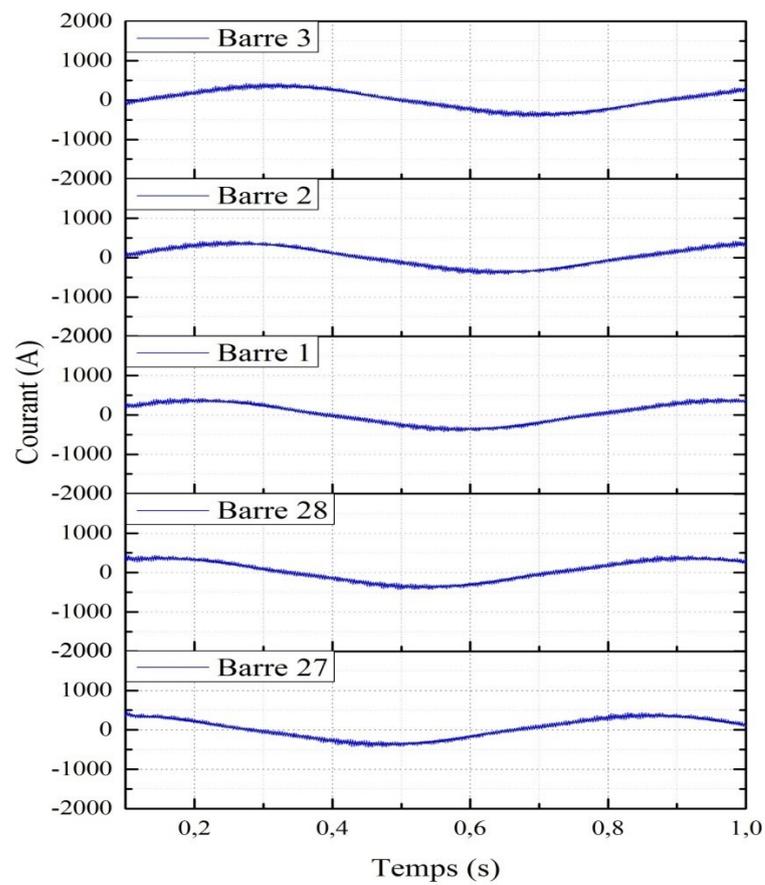


Figure 2-37 : Les courants rotoriques dans le cas d'une machine saine

## 2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous pourrions examiner Maxwell15. 0 logiciel. Tout d'abord, nous utilisons l'application logicielle RMXprt pour définir la géométrie de notre machine en ce moment et pour déterminer les performances saines de la machine asynchrone à cage d'écureuil de 5,5 kW par simulation.

Dans le but d'étudier certaines performances de la machine en régime dynamique (transitoire) on a créé un modèle 2D à partir de RMXprt où on a simulé la machine.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité du logiciel Maxwell 2D à déterminer et analyser les performances de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis.

# Chapitre 03

## ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES DE LA MACHINE EN PRÉSENCE DES CASSURES DES BARRES

---

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous consacrons notre étude à la cassure d'une ou plusieurs barres rotoriques. Les cassures des barres sont introduites en augmentant la résistance de la barre jusqu'à une valeur permettant d'annuler la circulation du courant. L'augmentation de la résistance sur Maxwell2D est uniquement possible en affectant à la barre cassée un matériau non conducteur.

Une fois le modèle de la machine asynchrone à cage établie, nous pouvons aborder l'aspect lié à la simulation de celle-ci en utilisant programme **Maxwell2D**. Cela permet de mettre en évidence le comportement du moteur asynchrone dans le cas où le rotor à l'état sain et dans le cas où le rotor à l'état défaillant.

### 3.2. Exploitation des résultats de simulation

Pour voir les cassures des barres sur le comportement dynamique de la machine, nous avons effectué 4 types de simulations différentes données comme suit :

- Machine saine (Rotor sain)
- Machine avec une barre cassée
- Machine avec deux barres cassées en adjacence
- Machine avec trois barres cassées en adjacences

Afin de comparer les résultats, les 4 simulations ont été effectuées pour les mêmes conditions à savoir :

- Un pas de simulation de 0,0005s
- Un temps de simulation de 1s
- Un couple de charge égale à 35N.m
- Une vitesse de rotation initiale nulle

### 3.2.1. Résultats de simulation pour la machine saine

Nous représentons dans les figures 3-1 à 3-4) les caractéristiques dynamiques de la machine à savoir : les courants statoriques, couple électromagnétique, vitesse de rotation et les courants dans les barres rotoriques.

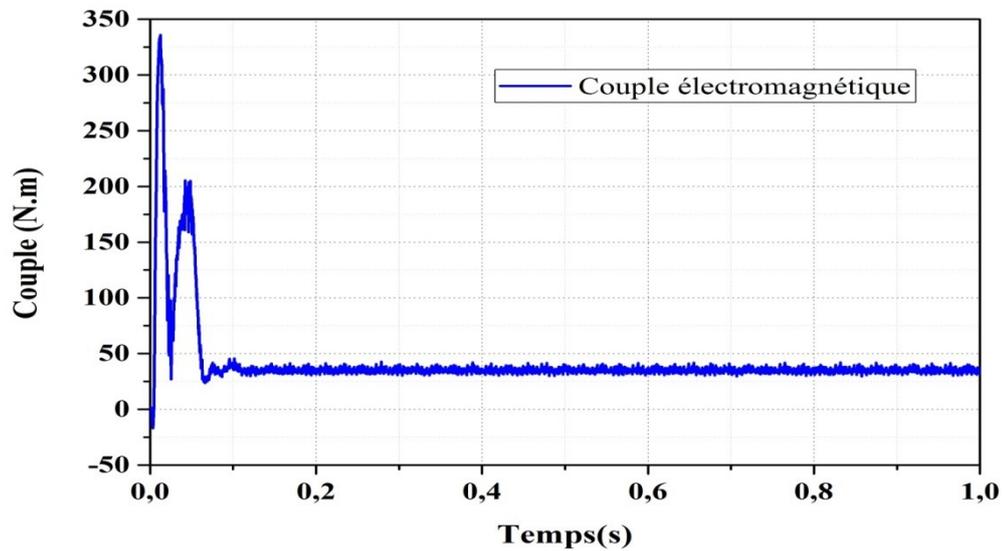


Figure 3-38 : Couple électromagnétique pour la machine saine

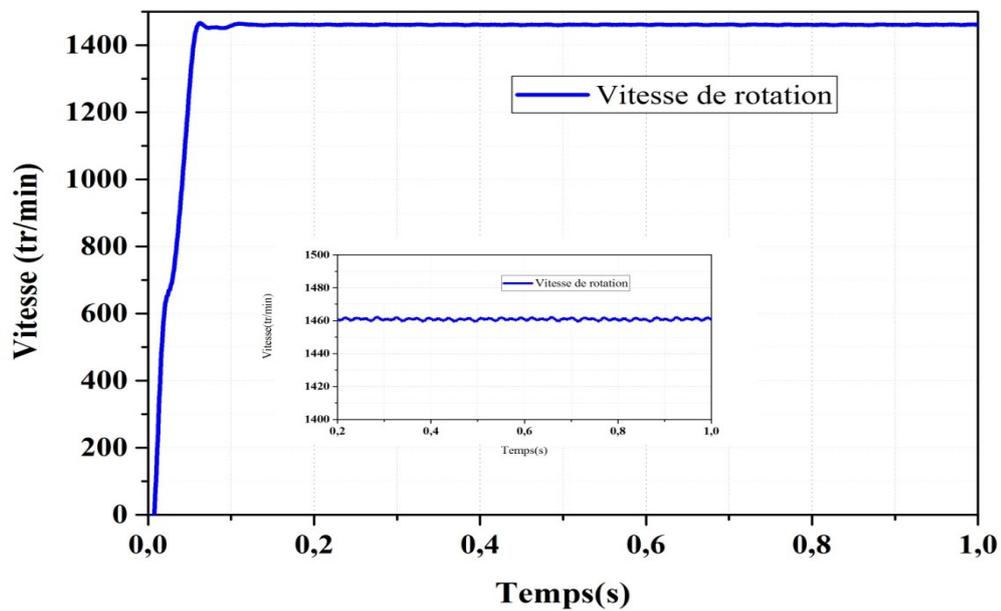


Figure 3-39 : Vitesse de rotation pour la machine saine

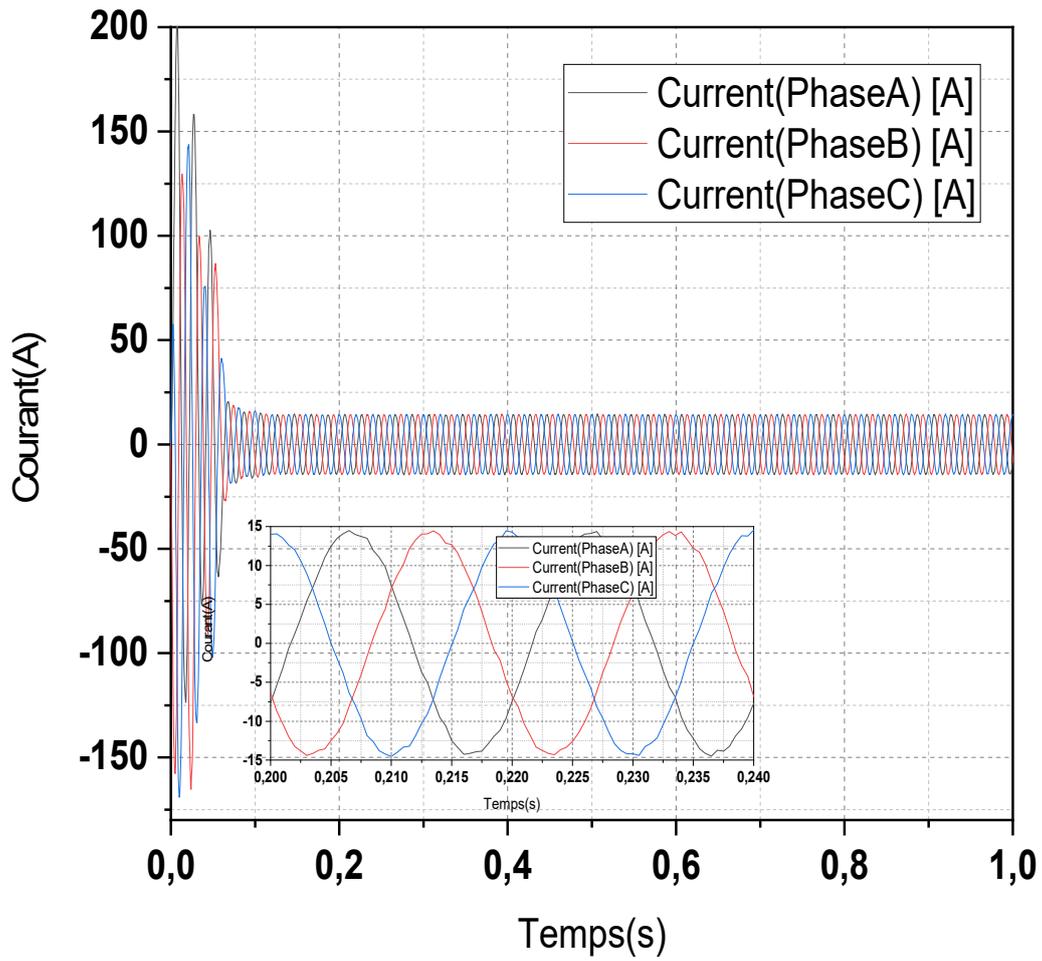


Figure 3-40 : Courants statoriques dans le cas de la machine saine

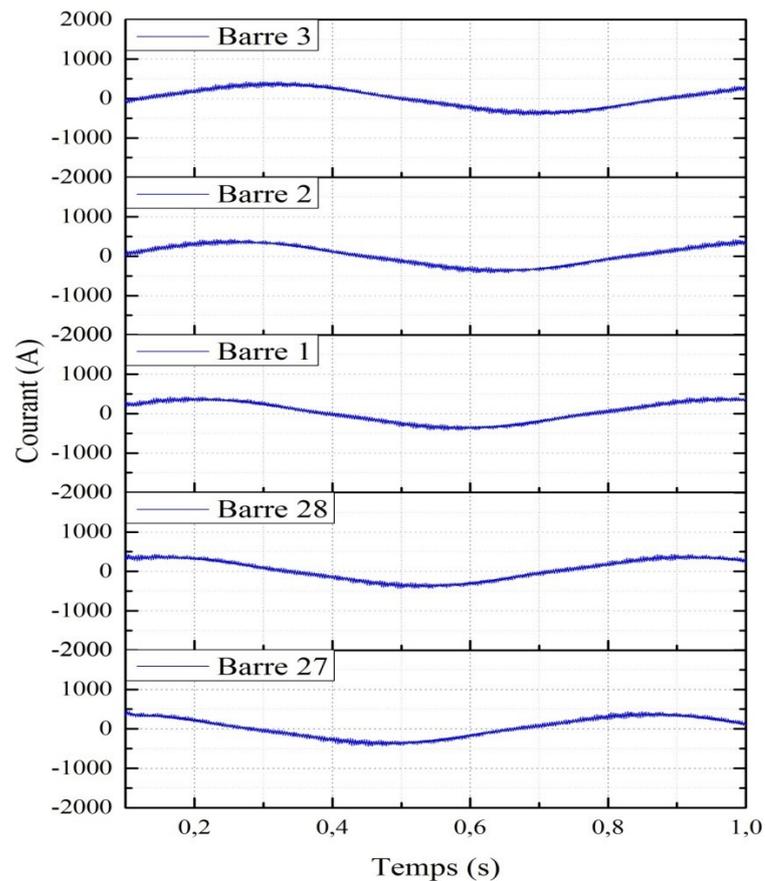


Figure 3-41 : Les courants rotoriques dans le cas d'une machine saine

Le modèle de la machine saine a donné des résultats significatifs. Les caractéristiques dynamiques de la machine montrent le passage de la machine par un régime transitoire qui a duré *100ms* avant l'établissement du régime permanent.

Ces résultats représentent une référence pour toute étude de performances de la machine en présence de défauts électriques ou mécaniques.

### 3.2.2. Résultats de simulation pour une machine avec une barre cassée

Dans ce cas nous introduisant dans le modèle de la machine une barre cassée comme montré sur la figure (3-5)

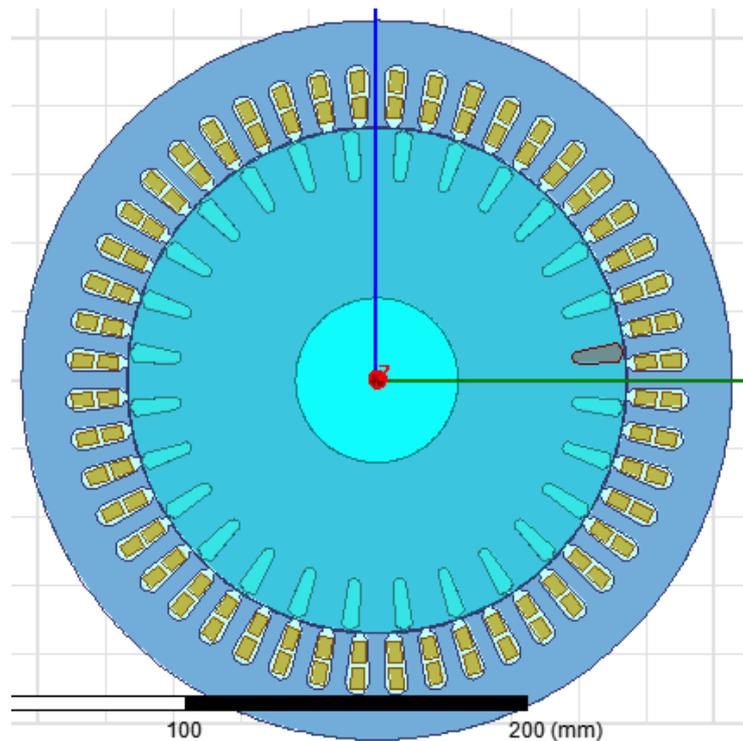


Figure 3-42 : Emplacement de la barre cassée dans le modèle 2D

Les figures (3-6 à 3-9) représentent les caractéristiques dynamiques de la machine à savoir : les courants statoriques, couple électromagnétique, vitesse de rotation et les courants dans les barres rotoriques.

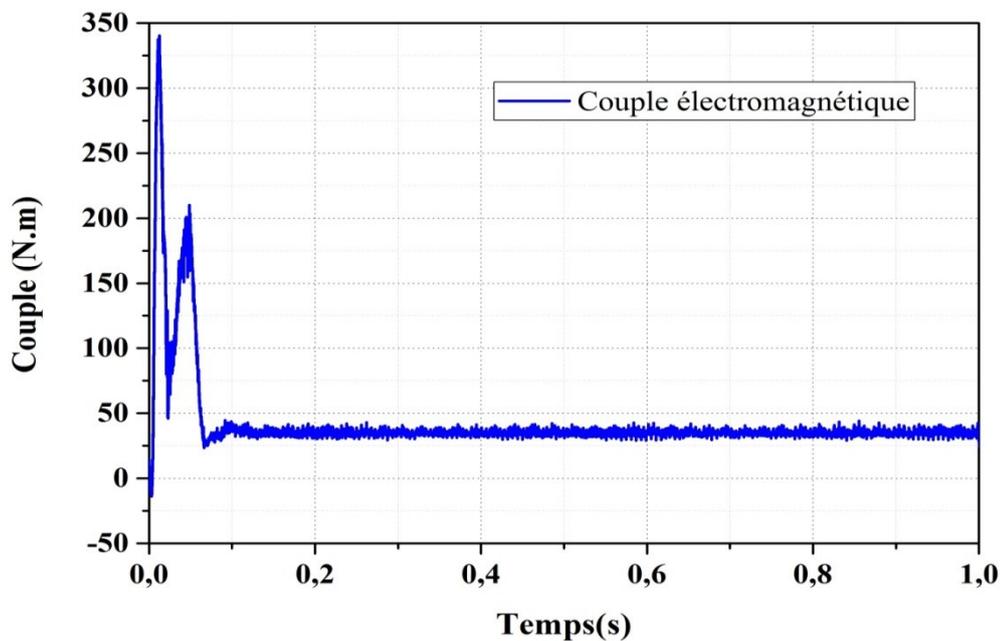


Figure 3-43 : Couple électromagnétique pour la machine avec une barre cassée

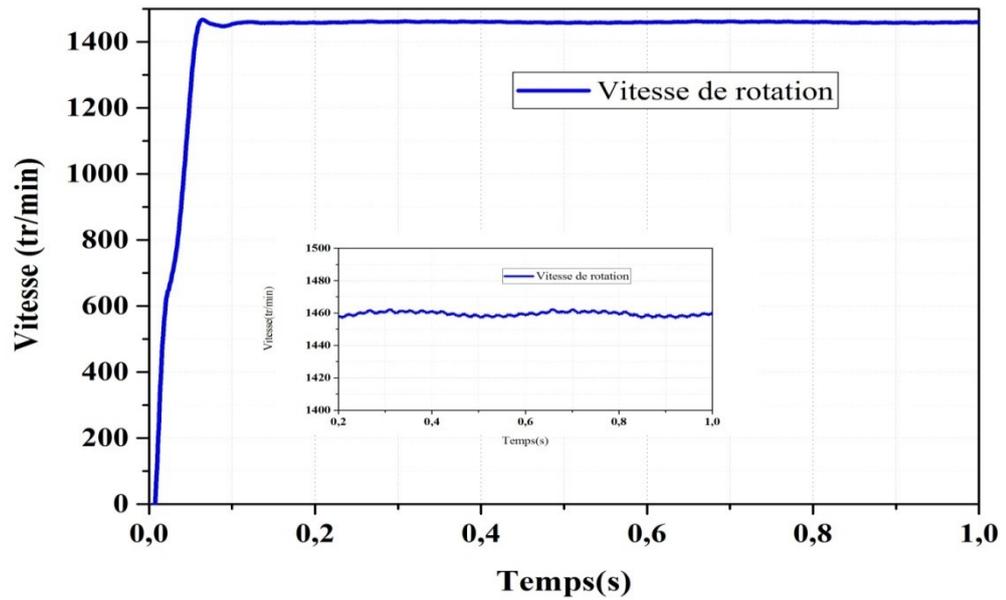


Figure 3-44: Vitesse de rotation pour la machine avec une barre cassée

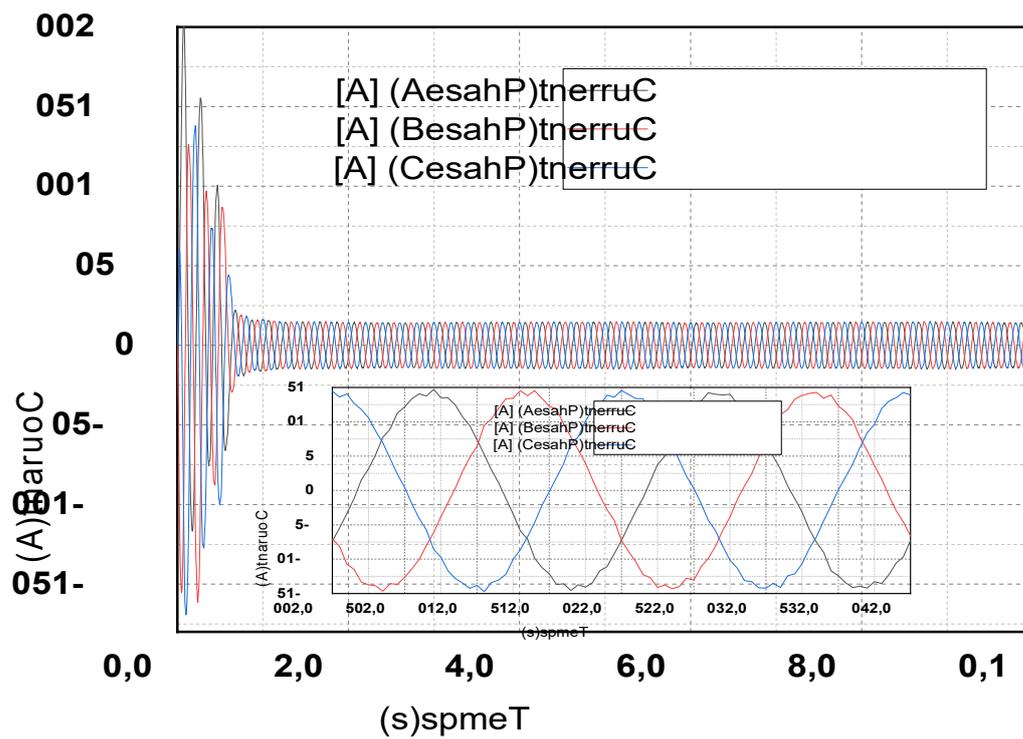


Figure 3-45 : Les courants statoriques pour une machine avec une barre cassée

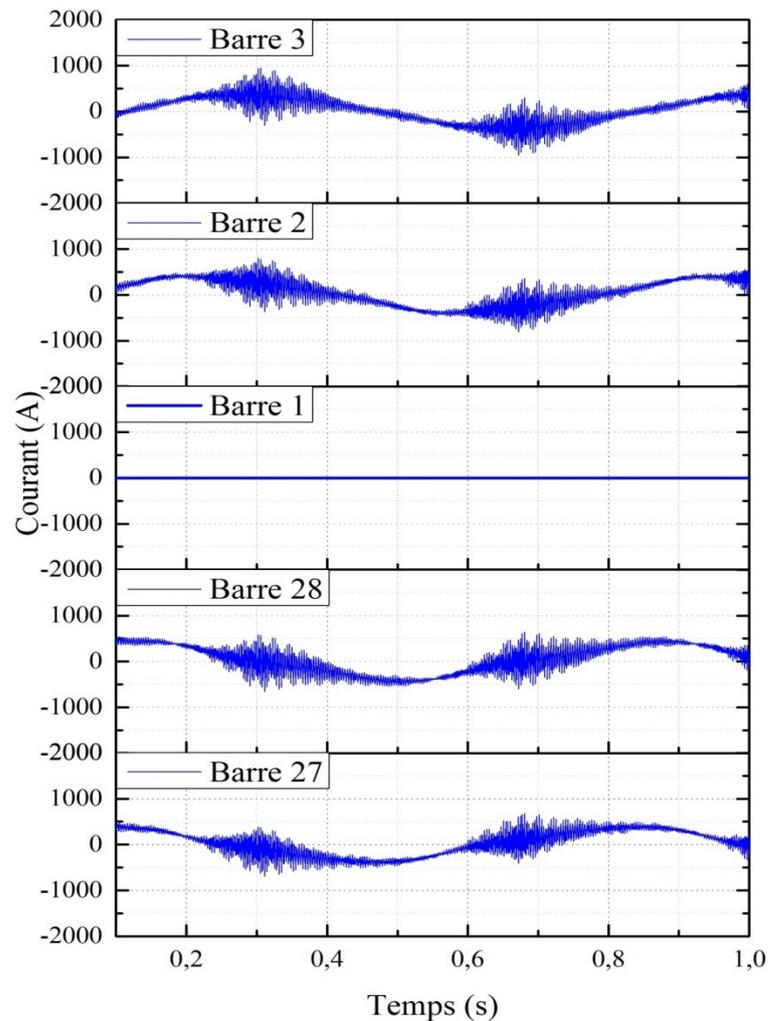


Figure 3-46 : Courants rotoriques pour une machine avec une barre cassée

Les résultats de simulation pour la machine avec une barre cassée montrent une légère modification des caractéristiques dans le régime permanent et le régime transitoire. Une faible modulation d'amplitude est visible les courants statoriques et la vitesse de rotation. Cette modulation d'amplitude est générée par la rotation du flux rotoriques non symétrique dans l'entree et sa fréquence est lié directement à la fréquence des courants rotoriques peut être calculé par la relation suivante :

$$f_{\text{modulation}} = g \cdot fs = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \cdot fs \quad (1)$$

$$f_{\text{modulation}} = \frac{1500 - 1460}{1500} \cdot 50 = 1,33 \text{ Hz}$$

Cette modulation d'amplitude peut être facilement détectée en effectuant une analyse spectrale des caractéristiques de la vitesse et du couple électromagnétique.

Les courants dans les barres rotoriques autour des barres cassées ont connu une augmentation dans l'amplitude du courant.

### 3.2.3. Résultats de simulation pour une machine avec deux barres cassées

Dans le deuxième cas nous avons introduit la rupture de deux barres rotoriques adjacentes. Les barres cassées sont choisies en adjacences car une fois une barre cassée les courants dans les barres qui se trouvent à côté seront siège d'une circulation de courants importante qui induit par la suite leur cassure. La figure 3-10 montres la position des barres cassées.

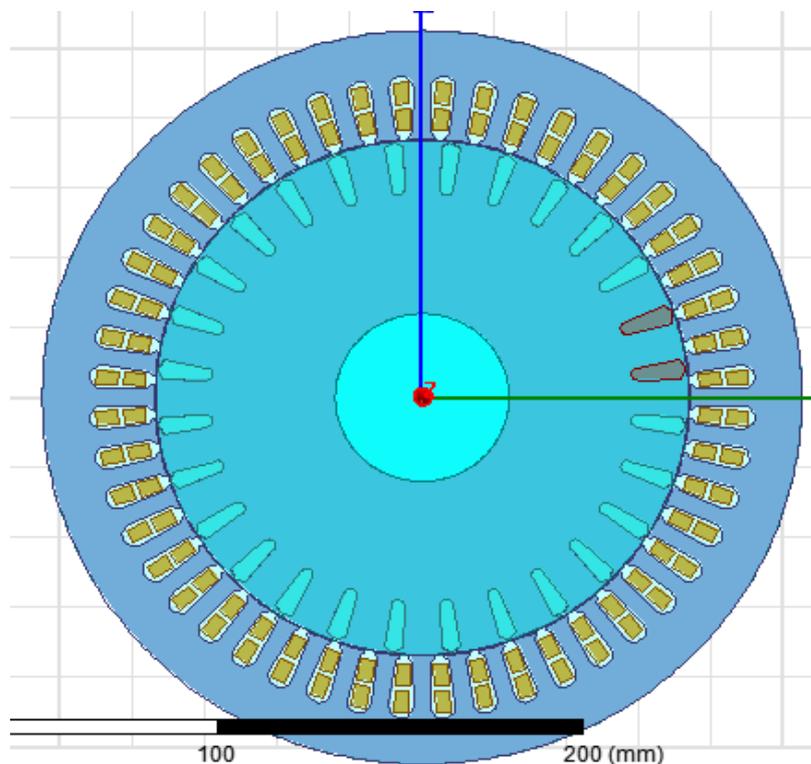


Figure 3-47: Emplacement des barres cassées dans le modèle 2D

Les figures (3-11 à 3-14) représentent les caractéristiques dynamiques de la machine à savoir : les courants statoriques, couple électromagnétiques, vitesse de rotation et les courants dans les barres rotoriques.

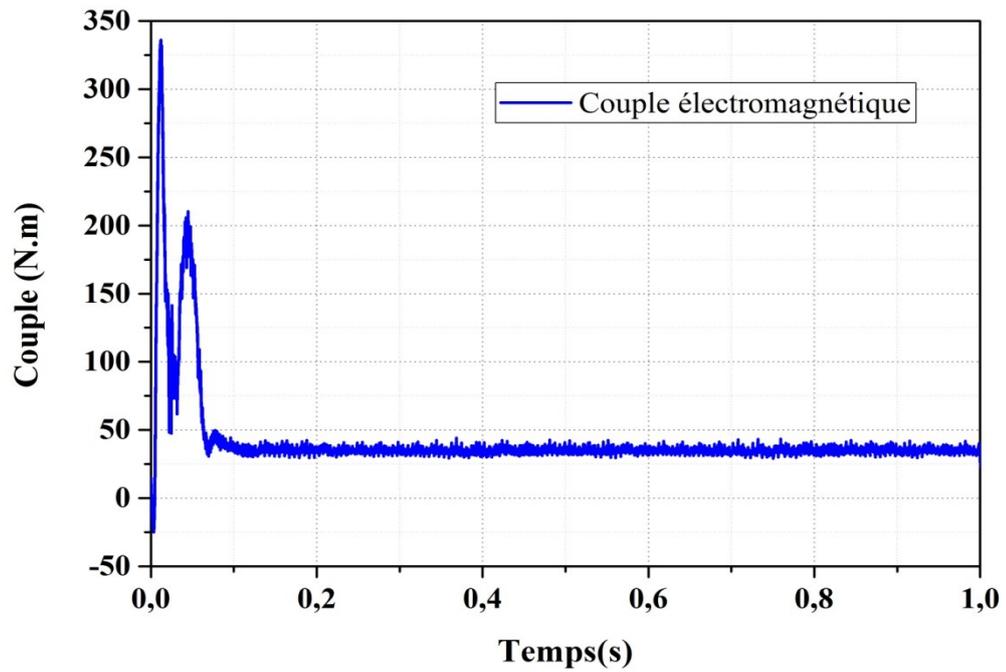


Figure 3-48 : Couple électromagnétique pour la machine avec deux barres cassées

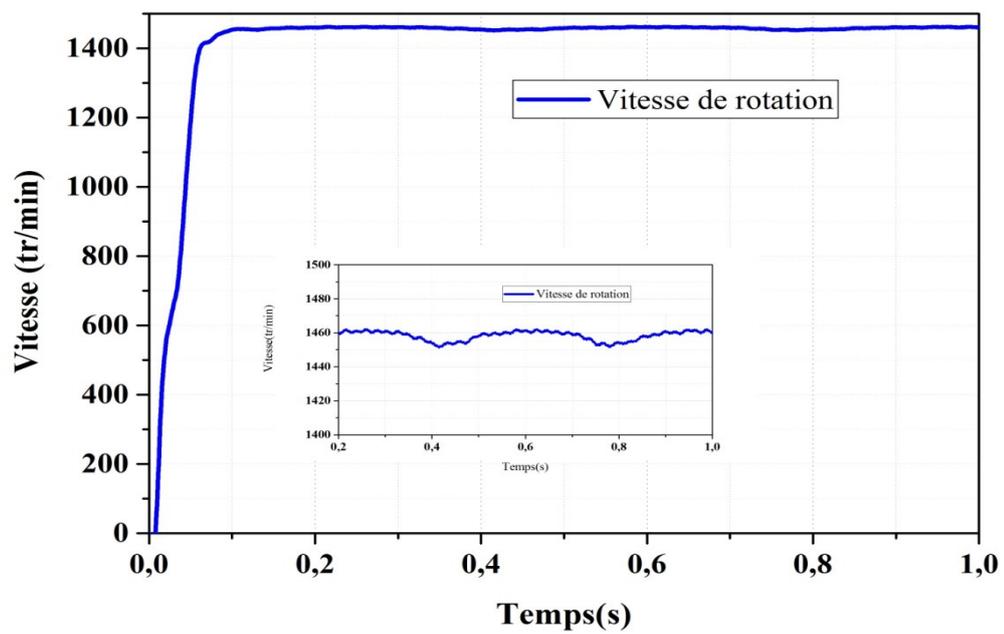


Figure 3-49: Vitesse de rotation pour la machine avec deux barres cassées

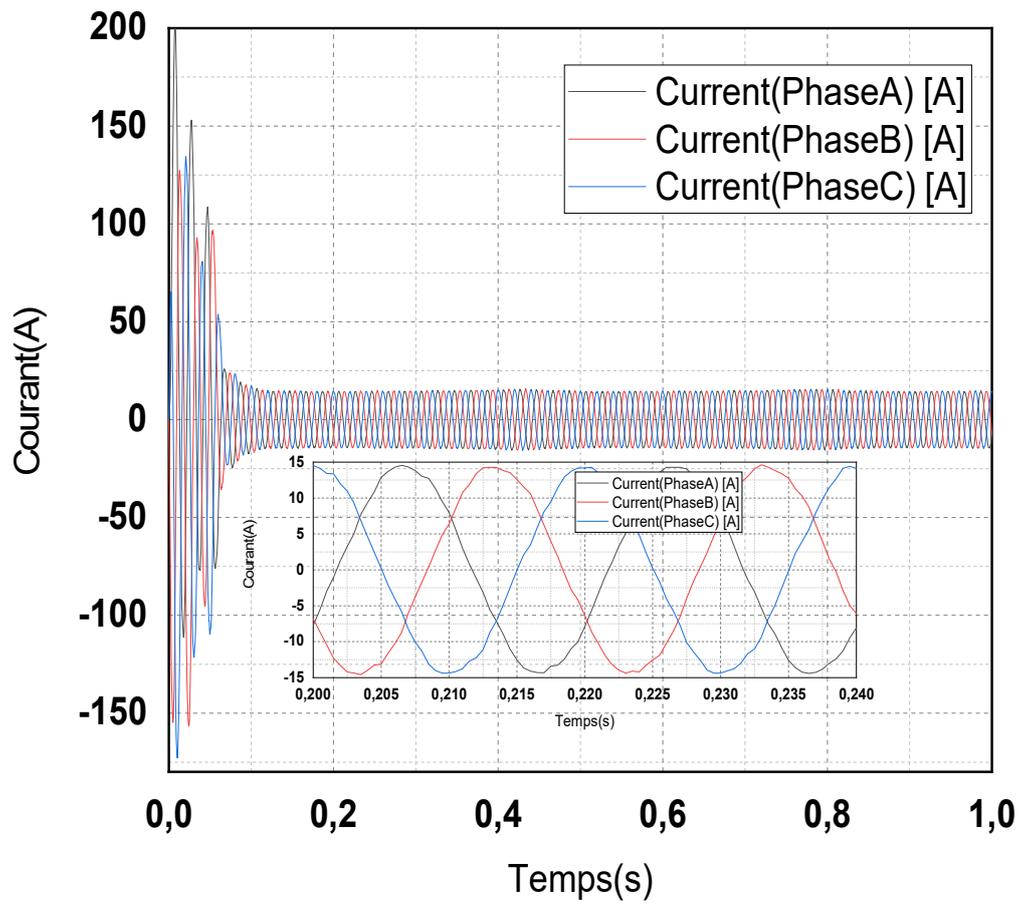


Figure 3-50 : Les courants statoriques pour une machine avec deux barres cassées

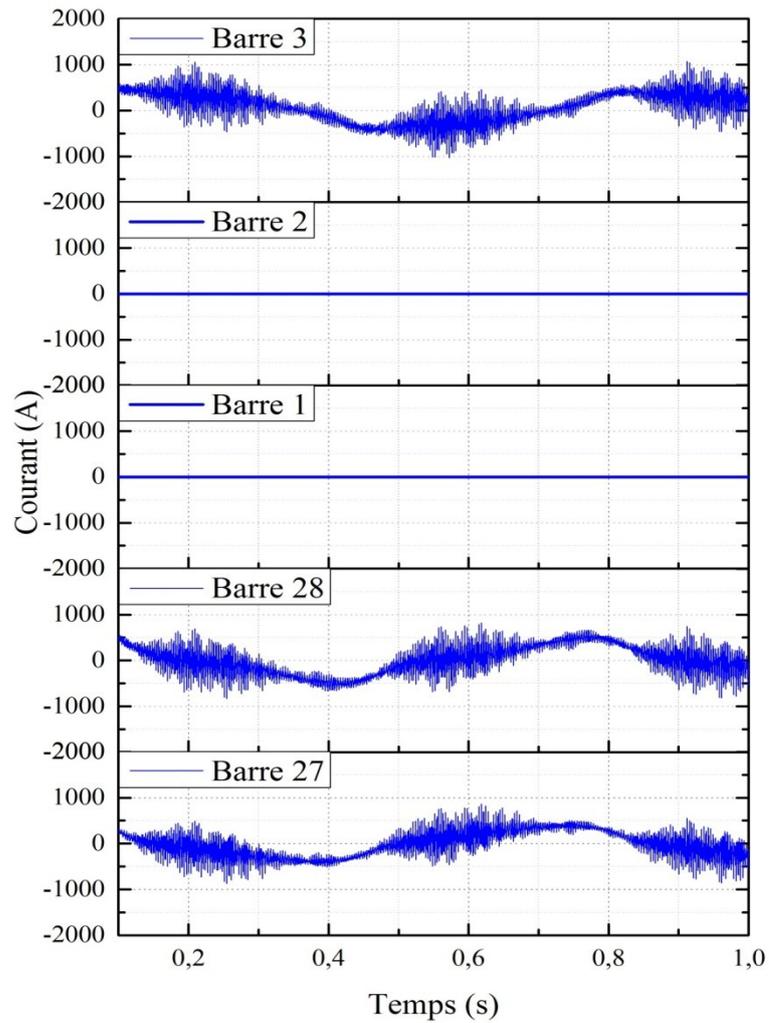


Figure 3-51 : Les courants rotoriques pour la machine avec deux barres cassées

### 3.2.4. Résultats de simulation pour une machine avec trois barres cassées

Dans le troisième cas nous avons introduit la rupture de trois barres rotoriques adjacentes.

Le figure (3-15) montre la position des barres cassées.

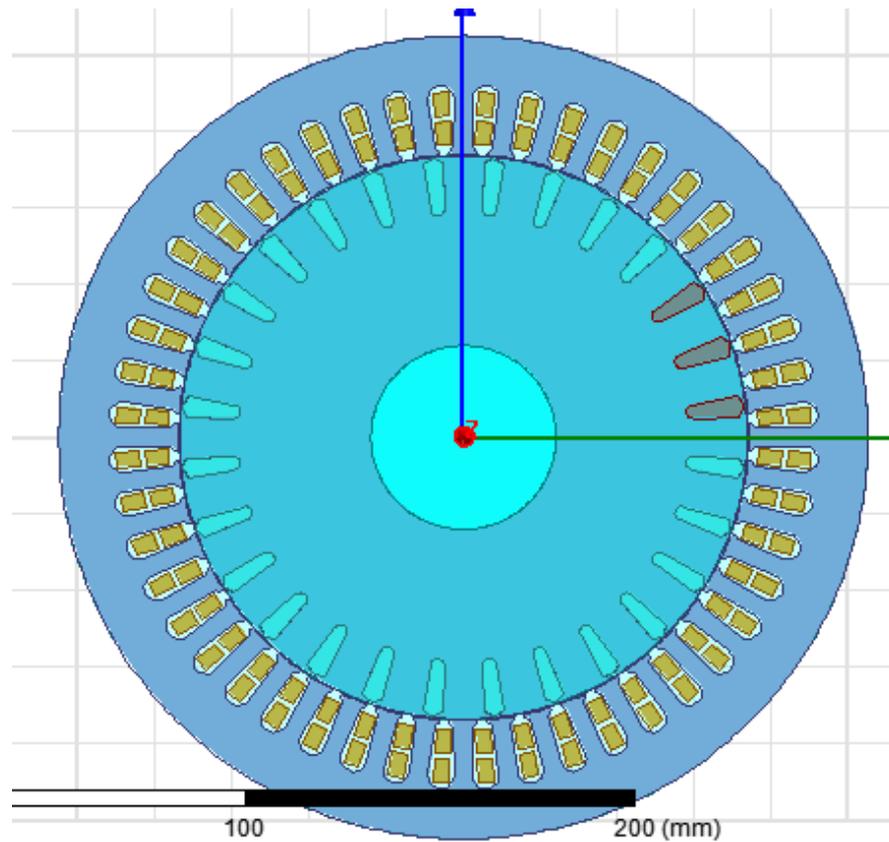


Figure 3-52: Emplacement des trois barres cassées dans le modèle 2D

Les figures (3-16 à 3-19) représentent les caractéristiques dynamiques de la machine à savoir : les courants statoriques, couple électromagnétique, vitesse de rotation et les courants dans les barres rotoriques.

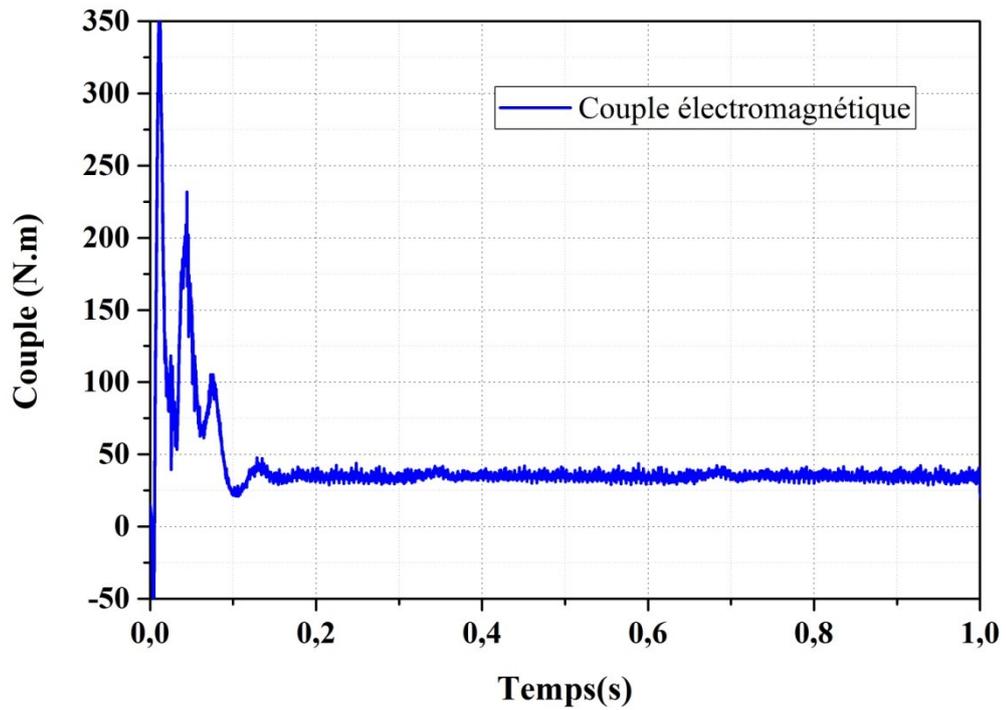


Figure 3-53 : Couple électromagnétique pour une machine avec trois barres cassées

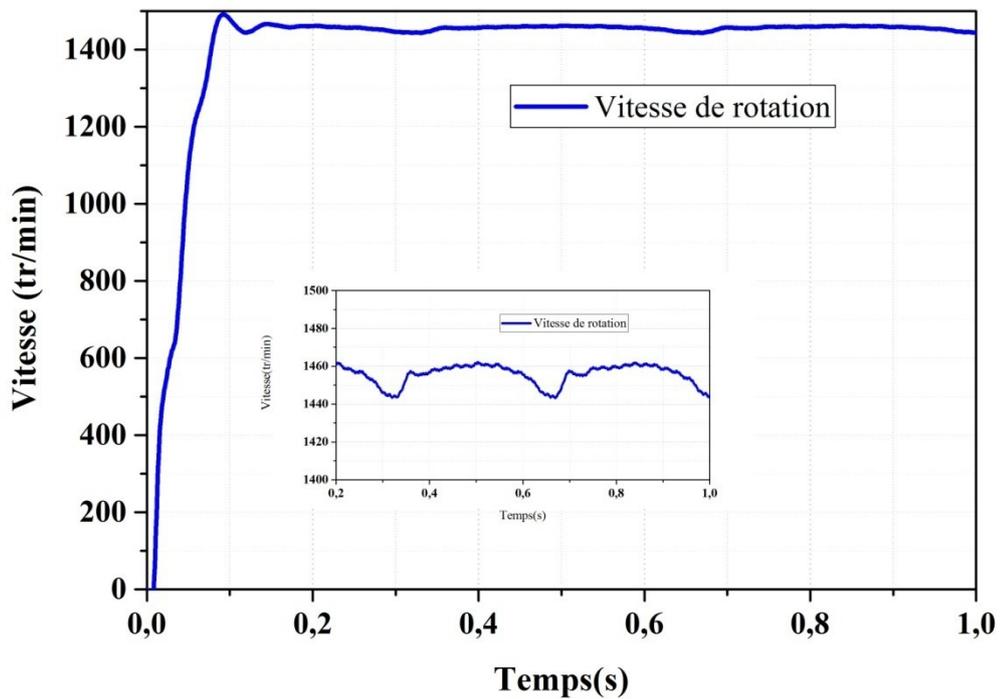


Figure 3-54 : Vitesse de rotation pour une machine avec trois barres cassées.

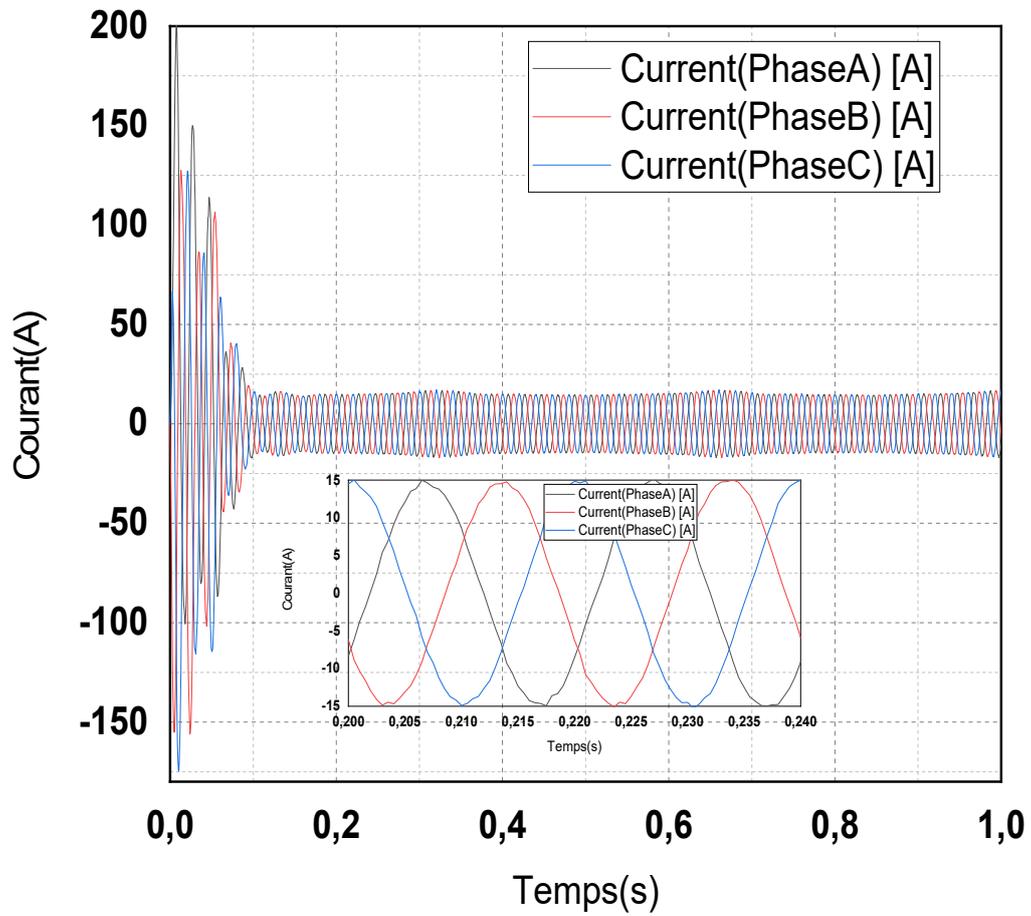


Figure 3-55: Les courants statoriques pour une machine avec trois barres cassées.

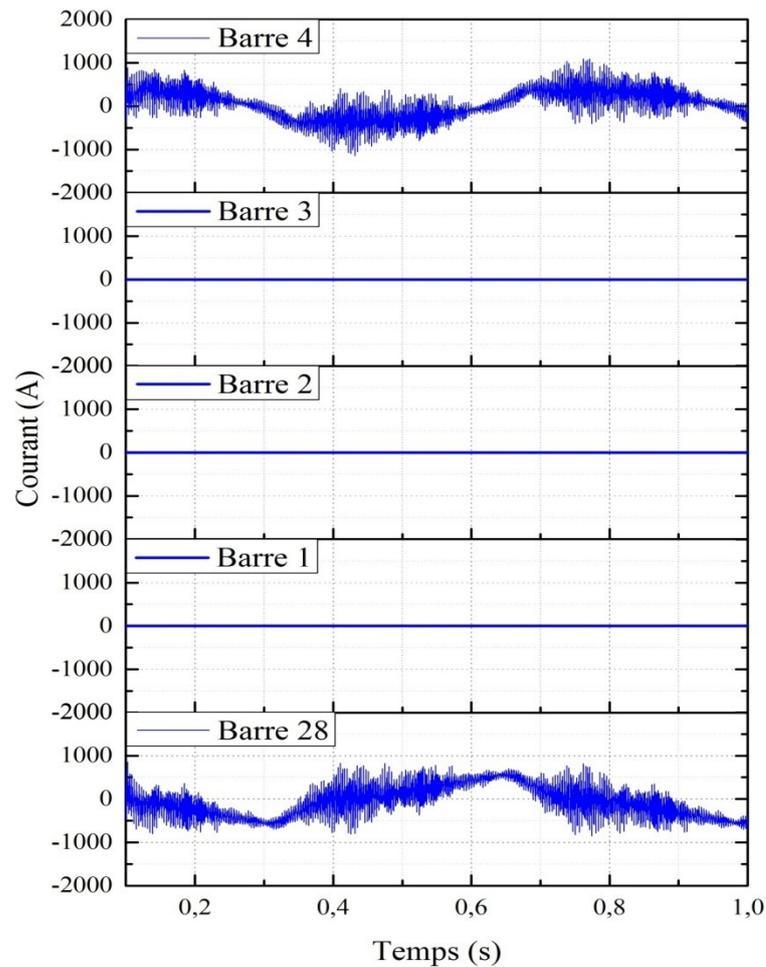


Figure 3-56: Les courants rotoriques pour une machine avec trois barres cassées.

En analysant les résultats de simulation pour les deux cas de 2 et 3 barres cassées, l'effet des cassures est devenu plus visible sur les caractéristiques électriques (courants statoriques et rotoriques) et sur les caractéristiques mécaniques (couple électromagnétique et vitesse de rotation). La modulation d'amplitude du courants statoriques est devenu également importante et se traduit par des fortes oscillations sur les caractéristiques mécaniques.

L'absence de courants dans les barres cassées annule ainsi leur participation à la formation de l'écoulement, ce qui explique la mise en tension des lignes d'écoulement de ces barres. Plus il y a de barres cassées, plus le déséquilibre de répartition des lignes d'écoulement est accentué.

### 3.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous étudions et analysons les performances du moteur asynchrone à cage d'écureuil triphasée en machine saine et le cas d'une machine avec cassures des barres rotoriques avec Maxwell 15.0. Ensuite, nous avons comparé les résultats obtenus pour voir le comportement de la machine.

Nous avons trouvé que la rupture d'une barre provoque des oscillations dans le couple et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique. L'amplitude de ces oscillations augmente avec le nombre de barres cassées.

En effet, nous avons pu déterminer l'effet d'une barre de rotor cassée sur d'autres tiges et sur la répartition de l'induction magnétique dans l'entrefer, plus le nombre de tiges cassées est élevé, la distorsion de la distribution des lignes d'écoulement deviendra de plus en plus

# CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

---

La machine asynchrone est la plus largement utilisée et l'un des éléments les plus importants des systèmes électriques, elle a fait et fait encore l'objet de plusieurs études.

Les travaux réalisés au cours de ce mémoire sont basés sur la modélisation des machines électriques et de la maîtrise du logiciel Maxwell 2D basé sur la méthode des éléments finis, nous avons conçu une performance simulée et analysée d'une machine asynchrone à cage d'écureuil 5.5KW. La conception et l'analyse ont été réalisées à l'aide des outils RMXprt et Maxwell 15.0.

Le logiciel Maxwell nous a permis d'avoir la géométrie et les paramètres de notre machine grâce à l'application RMXprt de cette dernière.

Pour atteindre l'objectif de nos travaux, nous avons pris en compte la présence de défaut de rupture des barres rotoriques, en conséquence, on constate que les barres à côté des barres cassées sont les plus sollicitées, ainsi que la détérioration du couple électromagnétique, on constate aussi que de plus en plus le nombre de barres cassées est élevé, la distorsion de la distribution des lignes d'écoulement deviendra de plus en plus apparente.

Les travaux qui ont été réalisés ont démontré l'efficacité du programme Maxwell pour prédire le comportement et les performances de la machine dans différents systèmes d'exploitation, travail qui peut être amélioré par l'étude et l'analyse du moteur en présence d'autres types de défauts.

---

## *Références Bibliographiques*

---

- [1] M. Doumbia , A. Traoré , MODELISATION ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A CAGE A L'AIDE DU LOGICIEL MATLAB/SIMULINK , January 2002.
- [2] Xiaogang Luo, Y. Liao, H. Toliyat, A.El-Antalby, T.Lipo, "Multiple coupled circuit modeling of induction machines", IEEE Transaction on Industry Application, vol.31, no.2, March/April 1995, pp. 311-318.
- [3] N.A. Al-Nuaim and H.A. Toliyat, "A novel method for modeling dynamic airgap eccentricity in synchronous machines based on modified winding function theory", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 13, no. 2, June 1998, pp. 156-162.
- [4] S.Meradi « Estimation des paramètres et des états de la machine asynchrone vue de diagnostic des défauts rotoriques » Mémoire de Magister, Université mohamed khider de Biskra le 27/06/2007.
- [5] M. Ammar, "Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones" Thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, 2012.
- [6] Abia.Bouguerne, « diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones », master en électrotechnique,université mentouri- constantine.
- [7] A. Bouguerne, "diagnostic automatique des defauts des moteurs asynchrones", memoire magister, universite de constantine, 2009.
- [8] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outil paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.
- [9] [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr) « Moteurs asynchrones : Choix et problèmes connexes », consulté le 24/12/2020.
- [10] GUETTAB ABDELKADER« Effet de l'alimentation sur la détection des défauts dans une machine asynchrone à cage basée sur l'analyse de signal du courant », mémoire de Magister, université de Chleff Avril 2011
- [11] Belhamdi. S « Prise en compte d'un défaut rotorique dans la commande d'un moteur asynchrone » thèse de magister, Université de Biskra 2005.page 05.
- [12] Hubert Razik, " Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone cas de défaillance, un état de l'art", Green-UHP.Faculté des Sciences. Revue 3EI n°29-Juin 2002 page 48-
-

---

52.

[13] A. H. Bonnett and G.C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 28, no. 4, July/August 1992, pp. 921-937.

[14] Hubert Razik, "Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone cas de défaillance, un état de l'art", Green-UHP.Faculté des Sciences. Revue 3EI n°29-Juin 2002 page 48-52.

[15] J.Faiz, B.M.Ebrahimi and M.B.B Sharifian « Time stepping finite element analysis of broken bars faults in a three-phase squirrel- cage induction motor. » progress In Electromagnetic Research, PIER 68,53-70, 2007 page 06.

[16] L.Szabo, J.B.Dobai, K.A.Biro, « Rotor faults detection in squirrel-cage induction motors by current signature analysis. »2004 IEEE-TTTC International Conference on Automation, quality and Testing, Robotics, may 13-15, 2004, Cluj-Napoca, Romania page 04.

[17] J.Faiz, B.M.Ebrahimi « Mixed fault diagnosis in three- phase squirrel- cage induction motor using analysis of air- gap magnetic field.» progress In Electromagnetics Research, PIER 64,239-255, 2006 page 07.

[18] Badreddine CHERMAT, "Diagnostic des défauts de MAS par les méthodes paramétriques de traitement du signal", Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 06 Juin 2012.

[19] V.Devanneaux, H.Kabbaj, B.Dagues et J.Faucher, « An accurate model of squirrel cage induction machines under static, dynamic or mixed eccentricity.» Proc. IEEE SDEMPED 2001 – Symposium on Diagnostics for Electric Machines , Power Electronics and Drives, pp.121-126, 1-3 septembre 2001, Grado, Italie. page 01

[20] J.Faiz, B.M.Ebrahimi and M.B.B Sharifian « Time stepping finite element analysis of broken bars faults in a three-phase squirrel- cage induction motor. » progress In Electromagnetic Research, PIER 68,53-70, 2007.page 06.

[21] Bennedjai Soumaya : Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA .Thèse Doctorat.

[22] BOUGUERNE Abla " Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones" mémoire de Magister en électrotechnique, Université MENTOURI Constantine, Année 2009

[23] Document Wikipédia, consulté le 15/12/2020.

[24] Site officiel ANSYS Maxwell technologies: Electricité-Electronique. Compagnie Direct-Industry " www. directindustry.fr ".

[25] Gaetan Didier. Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de

---

défaillances. Thèse Doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy-I. 2004.

---