



MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Par

BOURAHLA WISSAM KHEIRA et KERAOUTI ABDELKADER

Intitulé du sujet

Etude et comparaison par MEF d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil 28 barres et 48 barres rotoriques

Soutenu le 29 /06/ 2026 devant le jury composé de :

Présidente :	Mme Neddar Houaria	MCA	Université de Mostaganem.
Examineur :	Mr Omari Hamza	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Mr Chaouch Abdellah	Pr	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions **ALLAH** de nous avoir accordé la volonté, la patience et la santé tout au long de notre parcours académique, ce qui nous a permis de mener à bien ce travail.

A l'issu de ce travail, je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur **CHAOUCH Abdellah**, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn-Badis de Mostaganem pour avoir accepté de diriger avec beaucoup d'attention et de soin ce mémoire. Je lui suis très reconnaissant pour sa disponibilité, sa bienveillance et son soutien. Je lui dois beaucoup pour son aide aux différent es en traves rencontrées, pour sa gentillesse et ses qualités humaines.

J'exprimâmes remerciements à Madame **NEDDAR Houaria**, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn-Badis de Mostaganem, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

J'exprime ma gratitude à Monsieur **OMARI Hamza**, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn-Badis de Mostaganem, d'avoir bien accepté d'être examinateur de ce travail.

Aussi je remercie monsieur **BENOUALI Abdelhak**, chef de département de génie électrique. Ma profonde reconnaissance à tous les enseignants de la Faculté des Sciences et de la technologie, **Université Abdelhamid Ibn-Badis de Mostaganem**.

Je tiens à adresser mes vifs remerciements à ceux qui m'ont aidé à franchir les obstacles et les contraintes rencontrées durant ce travail

MERCI A TOUS.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire de fin d'études,

A mon cher Papa et mon oncle « Nacer ». Vous êtes toujours présents dans ma vie. Je vous aime beaucoup. Qu'Allah ait vos âmes et que les portes du paradis vous soient ouvertes.

A ma chère maman

Que Dieu te garde et te procure santé, bonheur et longue vie, pour que tu demeures le flambeau illuminant le chemin de tes enfants.

A mon frère et mes sœurs « Yacine, Kheira, Fatma, Siham et Wiam » Je vous témoigne toute mon affection et ma profonde reconnaissance pour votre courage et fraternité familiale. Ne croisez jamais les bras, car le meilleur reste à venir ! Du courage et bonne réussite dans vos projets futurs.

A ma famille,

Pour votre gentillesse et vos encouragements, Avec toute mon affection.

A binôme Abdelkader

A tous mes amis et mes collègues que je n'ai pas cités et à tous ceux qui me connaissent.

A vous enfin qui vous n'êtes pas là.

WISSAM KHEIRA BOURAHLA

Dédicace

*Je dédie ce travail à
À mes très chers parents Pour leur patience et leur réconfort dans Les
moments de doutes et de découragement.*

*À ma sœur Asia
À toutes mes copins: Ishem, Mohamed, Adem,
À tous mes enseignants.*

*À mon binôme Wissam
À tous mes collègues Et amies pour leurs conseils et leur soutien
précieux.*

*À tous ceux qui me sont chers
À tous ceux qui m'ont soutenue durant la réalisation de ce mémoire.*

Introduction générale

Chapitre I

I.....	3
I.1 Introduction	1
I.2 Constitution de la machine asynchrone.....	1
I.3 Les différentes parties du moteur asynchrone	2
I.3.1 Inducteur (Stator)	2
I.3.2 Rotor.....	3
I.3.2.1 Rotor bobiné (rotor à bagues)	4
I.3.2.2 Rotor à cage d'écureuil (rotor en court -circuit)	4
I.3.3 PALLIER	5
I.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone	5
I.5 Types de moteurs à asynchrone.....	6
I.5.1 Moteurs asynchrone triphasés	6
I.5.2 Moteurs asynchrone monophasés.....	6
I.6 Plaque signalétique.....	6
I.7 Applications industrielles	7
I.8 Les avantages du moteur asynchrone :.....	9
I.9 Conclusion.....	9

Chapitre II

II	10
II.1 Introduction	11
II.2 Les équations maxwell	11
II.2.1 L'équation de Maxwell-Gauss :.....	12
II.2.2 L'équation de Maxwell-Faraday :.....	12
II.2.3 L'équation de Maxwell- Ampère	12
II.3 Définition de la méthode des éléments finis	13
II.4 Étapes de résolution par la MEF	13
II.5 Discrétisation et approximation.....	14
II.6 Types d'éléments finis :	15
II.7 Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis.....	15
II.7.1 Avantages.....	15
II.7.2 Inconvénients	15

II.8	Conclusion :.....	16
------	-------------------	----

Chapitre III

III		17
III.1	Présentation du logiciel :	18
III.1.1	ANSYS Maxwell :	18
III.1.2	Maxwell 2D.....	18
III.1.3	Maxwell 3D.....	19
III.1.4	RMX prt	19
III.2		
III.2.1	Application Consacrer Moteur asynchrone triphasé avec 28 barres rotoriques .	19
III.2.1.1	Présentation les Différents paramètres du moteur	19
III.2.1.2	Présentation de la distribution champ magnétique du moteur étudié	24
III.2.1.3	Présentation les Performances du moteur étudié	26
III.2.1.4	Interprétation des Résultats d'analyse par RMxprrt.....	28
III.2.1.4.1	Courbe de l'évolution du couple en fonction de la vitesse.....	28
III.2.1.4.2	Courbe de l'évolution du Courant en fonction de la vitesse.....	28
III.2.1.4.3	Courbe du rendement en fonction de la vitesse	28
III.2.1.4.4	Courbe de la puissance en fonction de la vitesse.....	29
III.2.2	Application Consacrer Moteur asynchrone triphasé avec 48 barres rotoriques .	30
III.2.2.1	Présentation les Différents paramètres du moteur	30
III.2.2.2	Présentation de la distribution champ magnétique du moteur étudié	32
III.2.2.3	Présentation les Performances du moteur étudié	34
III.2.2.4	Interprétation des Résultats d'analyse par RMxprrt.....	36
III.2.2.4.1	Courbe de l'évolution du couple en fonction de la vitesse.....	36
III.2.2.4.2	Courbe de l'évolution du Courant en fonction de la vitesse.....	36
III.2.2.4.3	Courbe du rendement en fonction de la vitesse	37
III.2.2.4.4	Courbe de la puissance en fonction de la vitesse.....	37
III.3	Comparaison entre Moteur asynchrone triphasé avec 28 barres rotoriques et 48 barres rotoriques.....	38
III.3.1	Couples 28 barres VS couple 48 barres.....	38
III.3.2	Courant 28 barres VS courant 48 barres	39
III.3.3	Rendement 28 barres VS rendement 48 barres	40
	La Figure III- 28 représente les rendements en fonction de la vitesse	40
III.3.4	Puissance utile 28 barres VS puissance utile 48 barres.....	40

III.3.5	Couples 28 barres VS couple 48 barres (Maxwell 2D).....	41
III.4	Conclusion.....	42

Chapitre IV

IV		43
IV.1	Introduction	44
IV.2	Modélisation et simulation de la machine sous Maxwell-2D en mode défaillant....	44
IV.3	Effet de cassure des barres sur les performances de la machine	46
IV.4	Interprétation des résultats de simulation du modèle 2D	49
IV.4.1	Couple utile en fonction du temps.....	49
IV.4.2	Courant en fonction du temps	49
IV.4.3	Puissance électrique et puissance mécanique en fonction du temps	49
IV.5	Comparaison entre Moteur asynchrone triphasé Sans défaut avec 28 barres rotoriques et avec défaut (Cassures de deux barres)	50
IV.5.1	Couples 28 barres VS couple deux barres cassées	50
IV.5.2	Courant 28 barres VS courant deux barres cassées.....	51
IV.6	Conclusion.....	52

Conclusion générale

Bibliographies

Liste des figures

Figure I. 1 Eclaté d'un moteur asynchrone à cage	2
Figure I. 2 Stator d'une machine asynchrone (RAM Sucre Mostaganem)	3
Figure I. 3 Rotor d'une machine asynchrone (RAM Sucre Mostaganem).....	3
Figure I. 4 Rotor bobiné	4
Figure I. 5 Schéma de principe d'un rotor bobiné.....	4
Figure I. 6 Structure d'un rotor en cage d'écureuil	5
Figure I. 7 Plaque signalétique d'un moteur asynchrone	7
Figure I. 8 Les application du moteur asynchrone	8
Figure II. 1 Eléments classiques en une et deux dimensions.	15
Figure III. 1 Chaîne de simulation électromagnétique ANSYS	19
Figure III. 2 Type d'encoche du stator	20
Figure III. 3 Géométrie du stator.....	21
Figure III. 4 Type d'encoche du rotor	22
Figure III. 5 Géométrie du rotor	22
Figure III. 6 Conception de moteurs à induction dans Rmxprt	23
Figure III. 7 Géométrie 2D réduite de la machine asynchrone étudiée.....	24
Figure III. 8 Maillage de la géométrie 2D réduite du moteur	24
Figure III. 9 Flux de la géométrie 2D.....	25
Figure III. 10 Induction magnétique.....	25
Figure III. 11 Couple en fonction de la vitesse	26
Figure III. 12 Courant en fonction de la vitesse	27
Figure III. 13 Rendement en fonction de la vitesse.....	27
Figure III. 14 Puissance utile en fonction de la vitesse	28
Figure III. 15 Type d'encoche du rotor	30
Figure III. 16 Géométrie du rotor	31
Figure III. 17 Conception de moteurs à induction dans Rmxprt	31
Figure III. 18 Géométrie 2D réduite de la machine asynchrone étudiée.....	32
Figure III. 19 Maillage de la géométrie 2D réduite du moteur	32
Figure III. 20 Flux de la géométrie 2D.....	33

Figure III. 21 Induction magnétique.....	33
Figure III. 22 Couple en fonction de la vitesse	34
Figure III. 23 Courant en fonction de la vitesse	35
Figure III. 24 Rendement en fonction de la vitesse.....	35
Figure III. 25 Puissance utile en fonction de la vitesse	36
Figure III. 26 Couple en fonction de la vitesse	38
Figure III. 27 Courant en fonction de la vitesse	39
Figure III. 28 Rendement en fonction de la vitesse.....	40
Figure III. 29 Puissance utile en fonction de la vitesse	41
Figure III. 30 Couple en fonction de temps.....	42
Figure IV. 1 Géométrie 2D du moteur étudié en cas de défaut de cassure de barres.....	45
Figure IV. 2 Maillage de la section 2D du moteur étudié	45
Figure IV. 3 Flux de la géométrie 2D	46
Figure IV. 4 Induction magnétique	46
Figure IV. 5 Résultats de simulation du moteur étudié au démarrage en cas de cassure de deux barres adjacentes.....	49
Figure IV. 6 Couple en fonction de temps	50
Figure IV. 7 Courant en fonction de temps.....	51
Figure IV. 8 Puissance électrique et puissance mécanique en fonction de temps.....	52

Liste des tableaux

Tableau II. 1 Grandeur et potentiels.....	12
Tableau III. 1 Paramètres généraux du moteur	19
Tableau III. 2 Paramètres généraux du stator.....	20
Tableau III. 3 Paramètres généraux des encoches du stator.....	20
Tableau III. 4 Paramètres généraux de l'enroulement du stator.....	21
Tableau III. 5 Paramètres généraux du rotor.....	21
Tableau III. 6 Paramètres généraux des encoches du rotor.....	22
Tableau III. 7 Paramètres généraux des barres rotoriques	22
Tableau III. 8 Paramètres de la machine	23
Tableau III. 9 Résultats obtenus.....	29
Tableau III. 10 Paramètres généraux du rotor.....	30
Tableau III. 11 Paramètres généraux des encoches du rotor.....	30
Tableau III. 12 Paramètres généraux des barres rotoriques	31
Tableau III. 13 Résultats obtenus en simulant avec RMxpert. (Rated Performance).....	37

Introduction générale

L'électricité peut être employée pour transporter l'énergie d'un point à un autre, on l'utilise comme vecteur énergétique. On a en premier lieu une énergie primaire (hydroélectrique, nucléaire, thermique...) qu'on transforme en énergie mécanique (rotation), qui elle-même est transformée dans une centrale électrique en énergie électrique via un générateur électrique. Celles-ci fonctionnent en grande partie grâce aux effets du magnétisme. Ces machines sont théoriquement réversibles, servant à passer de l'énergie électrique à une énergie mécanique (fonctionnement moteur). Le moteur asynchrone est l'un des composants qui servent à passer de cette énergie à une énergie mécanique pour assurer certaines fonctions dans le domaine de l'industrie et dans d'autres domaines aussi [16].

Actuellement, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion Électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique. Des applications de la machine asynchrone à vitesse variable, ont vu le jour dans divers domaines en l'occurrence l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision. Toutefois, cette machine peut être affectée par des défauts potentiels qui se répercutent sur la sécurité de la production, la qualité du service et la rentabilité des installations. Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machines [17].

Dans notre travail nous allons utiliser « ANSYS Maxwell® », qui est un logiciel de simulation de champs électromagnétiques pour la conception et l'analyse des moteurs électriques, actionneurs, capteurs, transformateurs et autres dispositifs électromagnétiques et électromécaniques. Ce laboratoire électromagnétique virtuel utilise la méthode précise des éléments finis pour résoudre des équations du champ électromagnétique et électrique dans les cas statique et transitoire [16].

Notre travail est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre nous présenterons le moteur asynchrone, à savoir ses composants principaux ainsi que ses caractéristiques et son principe de fonctionnement.

Le deuxième chapitre est consacré à les équations de Maxwell de divers types, en plus de mentionner les méthodes numériques les plus importantes qui aident à l'étude des machines électriques par l'ordinateur, dont la plus importante est la méthode MEF, qui sera utilisée dans cette étude des machines MAS

Le troisième chapitre se résume en une analyse numérique des performances du moteur étudié sous différents états de fonctionnement à l'aide du logiciel de simulation « ANSYS Maxwell® ».

Le dernier chapitre nous avons fait une comparaison entre un moteur en état marche avec un moteur défectueux, les deux moteurs avaient 28 barres.

Chapitre I

Rappels sur les moteurs asynchrones

I.1 Introduction

Le moteur asynchrone est l'une des machines les plus utilisées dans l'industrie. Cet intérêt croissant s'explique par ses nombreux avantages, notamment son rapport puissance poids, sa robustesse, sa facilité d'installation et son faible coût. Malgré sa robustesse, le moteur à induction, comme toute machine électrique, est susceptible de subir des pannes électriques ou mécaniques. [1].

Ce chapitre, débute par un rappel sur la constitution de la machine asynchrone ainsi que le principe de fonctionnement ; vers les types de moteurs à asynchrone et les applications industrielles, arrivons aux avantages.

I.2 Constitution de la machine asynchrone

La constitution de base d'une machine asynchrone comprend un stator, un rotor et un système de ventilation.

Le stator est la partie fixe de la machine et est composé d'un empilement de tôles de fer laminé avec des encoches pour contenir les bobines de cuivre. Les bobines sont disposées à intervalles réguliers autour du stator, créant ainsi des pôles magnétiques.

Le rotor est la partie mobile de la machine et est également composé d'un empilement de tôles de fer laminé. Les barres de cuivre sont placées dans les encoches du rotor et reliées à des anneaux de cuivre (ou bagues) à chaque extrémité. Lorsque le rotor tourne, un champ magnétique est créé par l'interaction avec le champ magnétique du stator.

Le système de ventilation assure la circulation de l'air à travers la machine pour maintenir la température à un niveau acceptable et éviter la surchauffe. Les ventilateurs sont souvent montés sur l'arbre du rotor pour une ventilation efficace.

En somme, la machine asynchrone est constituée d'un stator, d'un rotor et d'un système de ventilation, qui fonctionne ensemble pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique [2].

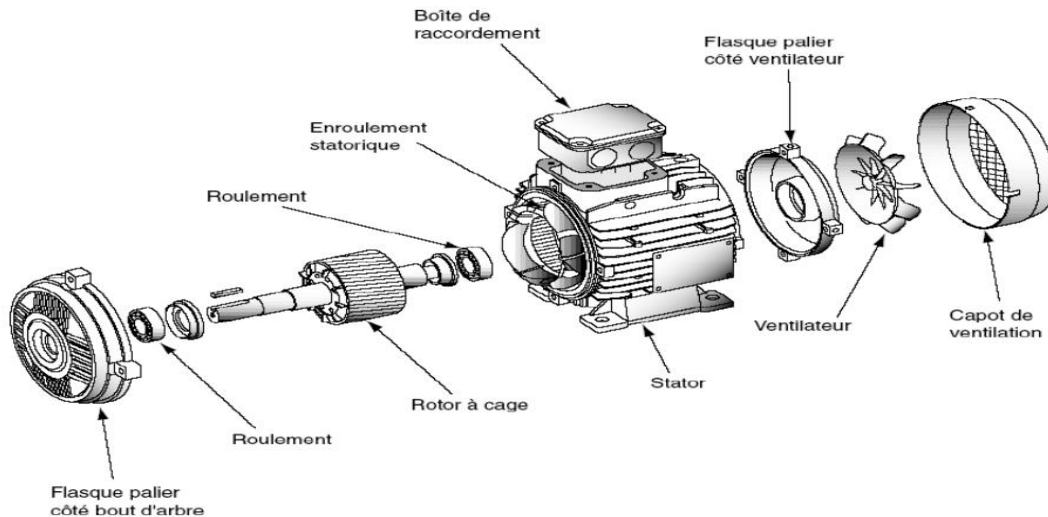


Figure I. 1 Eclaté d'un moteur asynchrone à cage

I.3 Les différentes parties du moteur asynchrone

I.3.1 Inducteur (Stator)

Le stator est la partie fixe ou statique de la machine asynchrone.

Il se compose principalement :

➤ **L'extérieur :**

- De la carcasse.
- Des paliers.
- Des flasques de paliers.
- Du ventilateur refroidissant la machine.
- Le capot protégeant le ventilateur.

➤ **L'intérieur :**

- Un noyau en fer (paquet statorique) feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique.
- Les enroulements (bobines en cuivre) des trois phases logées dans les encoches du noyau.

Le stator d'une machine asynchrone est identique à celui de la machine synchrone alimenté par des courants triphasés de fréquence f en produisant un champ magnétique tournant.

➤ **L'entrefer :**

Cette partie amagnétique (c'est de l'air ou un vide) est d'épaisseur la plus faible possible, elle permet le mouvement du rotor par rapport au stator [3].



Figure I. 2 Stator d'une machine asynchrone (RAM Sucre Mostaganem)

I.3.2 Rotor

Le rotor d'un moteur à induction est sa partie mobile, tournant autour de son axe. Il est constitué d'un noyau en acier bobiné sur lequel sont fixées des barres de cuivre ou d'aluminium, appelées « cages d'écureuil » en raison de leur forme. Ces barres sont reliées entre elles par des anneaux de cuivre ou d'aluminium, formant ainsi un circuit électrique fermé. Lorsqu'un courant électrique est appliqué au moteur, un champ magnétique est généré dans le stator (la partie fixe du moteur), lequel induit un courant électrique dans les barres du rotor. Ce courant génère un champ magnétique dans le rotor, qui interagit avec le champ magnétique du stator pour produire un couple. [2].



Figure I. 3 Rotor d'une machine asynchrone (RAM Sucre Mostaganem)

On distingue deux types de rotor :

I.3.2.1 Rotor bobiné (rotor à bagues)

C'est un cylindre plein feuilleté pourvu d'encoches régulièrement réparties sur sa face externe, ces encoches logent un bobinage triphasé de même nombre de pôles que le stator, ce bobinage est couplé en étoile sont reliés à des bagues, portées sur l'arbre de la machine sur les qu'elles frottent trois balais isolés qui permettant de fermer ce bobinage rotorique sur un rhéostat de démarrage [4].

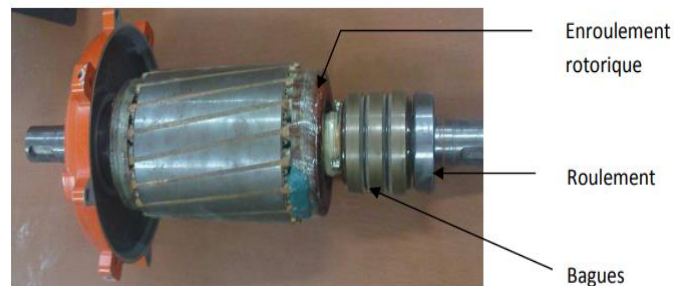


Figure I. 4 Rotor bobiné

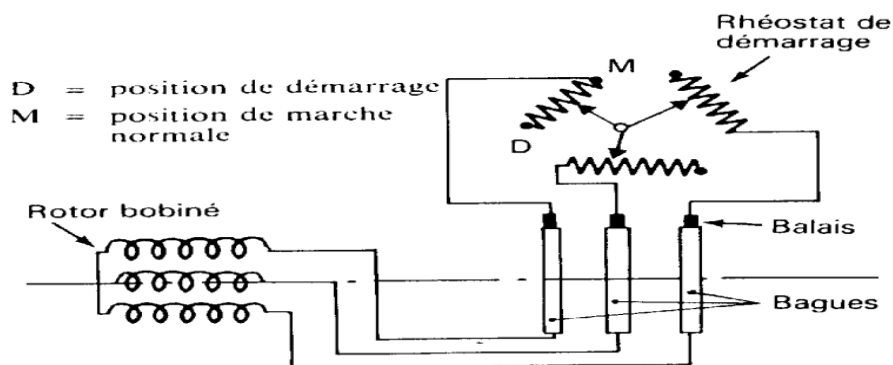


Figure I. 5 Schéma de principe d'un rotor bobiné

I.3.2.2 Rotor à cage d'écureuil (rotor en court-circuit)

Comme les trois enroulements rotoriques couplés en étoile sont fermés sur eux-mêmes, on peut rendre cet enroulement beaucoup plus simple, et robuste en le fabriquant sous une forme d'une cage d'écureuil, c'est-à-dire par un ensemble de barres de cuivre, ou d'aluminium disposées sur la périphérie de rotor parallèlement à son axe et réunies sur chacune des phases de l'armature par un anneau de même métal mais d'assez forte section appelé anneau de court-circuit d'où le nom : rotor en court-circuit [4].

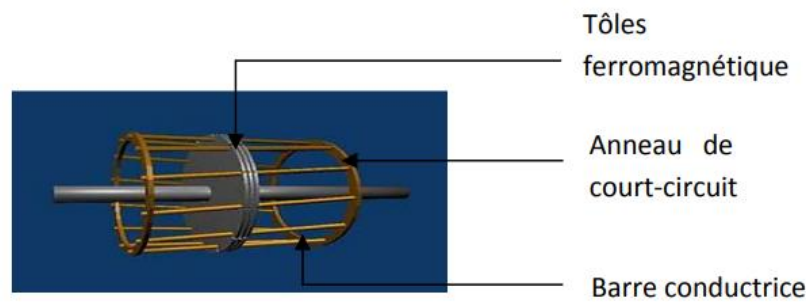


Figure I. 6 Structure d'un rotor en cage d'écureuil

I.3.3 PALLIER

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 et d'ailettes qui permettent le refroidissement du moteur [5].

Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage [6].

I.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction, la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit.

Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse N_r différente du synchronisme, l'application de la loi de Faraday à un des roulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice $e = -d\phi/dt$ qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces de Laplace ($d\vec{F} = i \cdot d\vec{L} \wedge \vec{B}$) s'exerçant sur le rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine.

Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est [7] [8] :

$$N_s = f / p \text{ en tr/s ou } N_s = 60f / p \text{ en tr/min}$$

Où f : est la fréquence d'alimentation.

p : représente le nombre de paires de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (N_s) diffère de celle du rotor (N_r), c'est à dire lorsque $N_s \neq N_r$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $N_s = N_r$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique [7].

I.5 Types de moteurs à asynchrone

Les moteurs à induction sont classés en deux catégories principales en fonction du courant alternatif fourni : les moteurs à induction triphasés et les moteurs à induction monophasés.

I.5.1 Moteurs asynchrone triphasés

Le stator d'un moteur à induction triphasé comporte trois jeux d'enroulements symétriques. Lorsque le courant alternatif triphasé est fourni aux enroulements de la bobine, les champs magnétiques rotatifs ayant la même fréquence que le courant alternatif sont générés pour entraîner le rotor [9].

I.5.2 Moteurs asynchrone monophasés

Le stator contient un enroulement primaire et un enroulement auxiliaire. L'enroulement principal est conçu pour produire un champ magnétique lorsqu'un courant alternatif est appliqué. L'enroulement auxiliaire est utilisé pour créer un champ magnétique rotatif [9].

I.6 Plaque signalétique

Sur chaque moteur électrique, vous devez trouver **une plaque signalétique**. Cette plaque est utilisée comme carte d'identité de votre moteur électrique. On y retrouve les informations principales de l'appareil avec des normes établies pour standardiser les différents modèles, notamment des normes de sécurité.

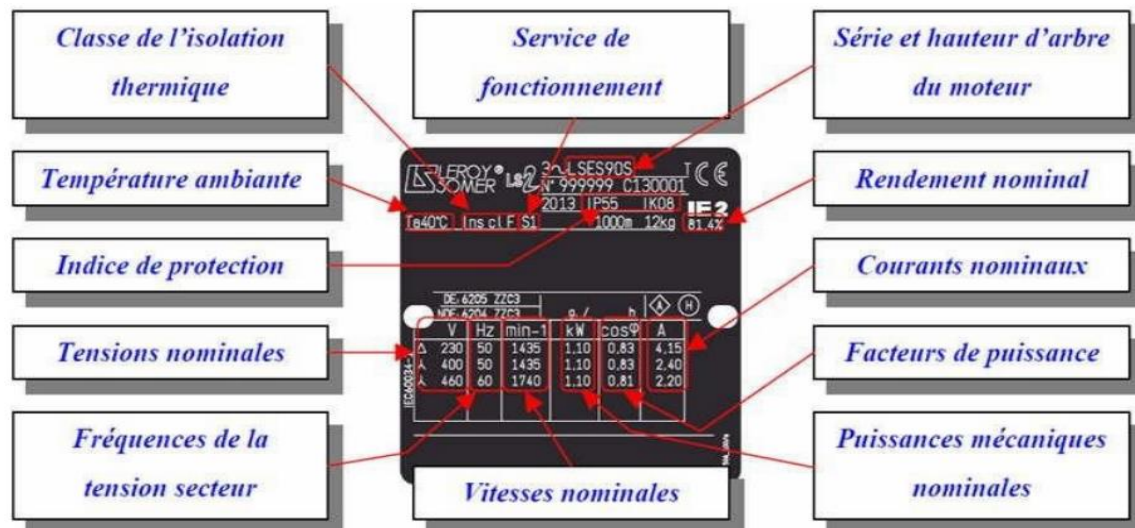


Figure I. 7 Plaque signalétique d'un moteur asynchrone

I.7 Applications industrielles

Les moteurs à induction triphasés sont utilisés pour entraîner diverses machines et équipements à des fins de fabrication.

1. Pompes et compresseurs : Les **moteurs asynchrones** sont couramment utilisés pour alimenter des pompes et des compresseurs industriels, tels que ceux que l'on trouve dans, les usines de traitement de l'eau et les installations de fabrication.
2. Convoyeurs et manutention : les moteurs asynchrones sont utilisés pour entraîner des bandes transporteuses, des ascenseurs et d'autres équipements de manutention dans les milieux industriels.
3. Ventilateurs et soufflantes : les moteurs asynchrones sont utilisés pour entraîner des ventilateurs et des soufflantes dans les systèmes de ventilation industriels, les systèmes de refroidissement et d'autres applications [10].



Convoyeurs



Pompes industrielles



Ponts Treuils



Ascenseurs



Ventilateurs/Soufflantes



Froid

Figure I. 8 Les application du moteur asynchrone

I.8 Les avantages du moteur asynchrone :

Comparé au moteur shunt, le moteur asynchrone a l'avantage d'être alimenté directement par le réseau triphasé. Son prix d'achat est moins élevé, il est beaucoup plus robuste car il ne nécessite pratiquement pas d'entretien.

Ses deux qualités fondamentales (prix et solidité) résultent du fait qu'il n'a pas de collecteur.

En effet, le collecteur est un organe coûteux et fragile qui nécessite un entretien fréquent :

Changement des balais [11].

I.9 Conclusion

Ce chapitre présente des informations générales sur les machines asynchrones et leurs différents composants, les différentes parties des moteurs à induction, leur principe de fonctionnement, les types de moteurs à induction et leurs avantages. Il permettra de préparer le terrain pour les chapitres suivants et de mettre en lumière la programmation des moteurs au sein du logiciel.

Chapitre II

Modélisation par Méthode Numérique par Méthode des Éléments Finis

II.1 Introduction

L'un des principes fondamentaux de la physique contemporaine est l'électromagnétisme, qui relie l'étude des champs électriques et magnétiques et de leurs interactions. Les quatre équations de base connues sous le nom d'équations de Maxwell, qui caractérisent précisément le comportement des champs électriques et magnétiques et leurs relations avec les charges et les courants électriques, constituent le fondement de ce domaine d'étude.

Ce chapitre explore les complexités des équations de Maxwell et de l'électromagnétisme, en examinant son importance et ses applications potentielles dans divers domaines scientifiques et techniques. Depuis les travaux novateurs de James Clerk Maxwell au XIXe siècle jusqu'aux développements les plus récents, l'étude de l'électromagnétisme a progressé de manière constante, approfondissant notre compréhension du cosmos et stimulant les progrès technologiques.

De plus, nous étudions la méthode des éléments finis (MEF), une méthode numérique puissante qui est fréquemment appliquée à la résolution d'équations aux dérivées partielles, telles que les équations de Maxwell.

Les ingénieurs et les scientifiques peuvent modéliser et analyser avec précision et efficacité des phénomènes électromagnétiques complexes grâce à la méthode des éléments finis (MEF), ce qui permet de construire et d'optimiser des dispositifs et des systèmes électromagnétiques.

Afin d'éclairer les fondements théoriques et les applications concrètes de l'électromagnétisme, des équations de Maxwell et de la méthode des éléments finis, ce chapitre propose un aperçu complet de chacun de ces sujets. Grâce à la compréhension de ces concepts et techniques, le lecteur pourra appréhender les principes fondamentaux de la théorie électromagnétique et son influence considérable sur de nombreux domaines scientifiques et techniques [12].

II.2 Les équations maxwell

Ces équations sont appelées aussi, équation générale de l'électromagnétisme, elles sont au nombre de quatre, elles permettent de décrire la plupart des phénomènes électromagnétiques. Elles donnent ainsi, un cadre mathématique précis au concept fondamental de champ introduit en physique par Faraday dans les années 1830.

Ces équations montrent notamment qu'en régime stationnaire, les champs électrique et magnétique sont indépendants l'un de l'autre, alors qu'ils ne le sont pas en régime variable.

Dans le cas le plus général, il faut donc parler du champ électromagnétique, la dichotomie électrique/magnétique étant une vue de l'esprit [13].

On les définit comme suit :

II.2.1 L'équation de Maxwell-Gauss :

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad \text{Ou} \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$$

ρ = densité de charge électrique (Unité : C/m³).

$\mathbf{D}$ = densité de flux électrique/champ de déplacement (Unité : C/m²).

II.2.2 L'équation de Maxwell-Faraday :

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$$

$\mathbf{B}$ = densité de flux magnétique (Unité : Tesla = V/m²).

$\mathbf{E}$ = intensité du champ électrique (Unité : V/m).

II.2.3 L'équation de Maxwell- Ampère

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t \quad \text{Ou} \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \partial \mathbf{E} / \partial t$$

$\mathbf{j}$ = densité de courant électrique (A/m²).

μ_0 = perméabilité magnétique du vide.

$\mathbf{H}$ [A/m] est l'intensité du champ magnétique

Tableau II. 1 Grandeur et potentiels

$\rho(\mathbf{r}, t)$	La densité volumique de charge électrique
$\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$	Le vecteur densité de courant
$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$	Le vecteur champ électrique
$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$	Le pseudo vecteur induction magnétique
ϵ_0	La permittivité diélectrique du vide
μ_0	La permittivité magnétique du vide
$\mu_0 \mu_r$	La permittivité magnétique du milieu

II.3 Définition de la méthode des éléments finis

Une méthode numérique appelée la méthode des éléments finis (MEF) est utilisée pour approximer les solutions aux problèmes de valeurs aux limites pour les équations aux dérivées partielles. Elle consiste à diviser un problème complexe en éléments plus petits et plus simples, dans lesquels le comportement de chaque élément est décrit par un ensemble d'équations. Ces équations sont ensuite combinées pour former un système d'équations qui peut être résolu afin d'approximer la solution du problème original. La MEF permet l'analyse des structures, des fluides, du transfert de chaleur et d'autres phénomènes physiques en discrétisant le domaine en éléments finis. La méthode est largement utilisée en ingénierie et dans les sciences appliquées en raison de sa polyvalence et de sa capacité à gérer des géométries complexes et des propriétés matérielles. La MEF est basée sur le principe de l'énergie potentielle minimale et utilise le calcul des variations pour dériver les équations gouvernantes du problème. Les procédures d'analyse des erreurs sont utilisées pour évaluer la précision de la solution numérique obtenue en utilisant la Méthode des Éléments Finis, la méthode a été largement étudiée et perfectionnée au fil des ans pour résoudre des problèmes tels que les modes parasites et les singularités dans la solution. La MEF est un outil puissant pour résoudre un large éventail de problèmes dans divers domaines de la science et de l'ingénierie [12].

II.4 Étapes de résolution par la MEF

Les étapes de la méthode des éléments finis pour un moteur asynchrone triphasé peuvent être décrites comme suit :

1. Modélisation géométrique : La première étape consiste à créer un modèle géométrique du moteur asynchrone monophasé. Cela comprend la représentation des différentes parties du moteur, telles que le stator, le rotor, les enroulements, etc. Le modèle géométrique doit être précis et refléter les dimensions réelles du moteur.

2. Discrétisation du domaine : Le domaine du moteur est discrétisé en éléments finis. En fonction de la géométrie et de la complexité du moteur, on peut utiliser des éléments finis 2D (par exemple, des triangles ou des quadrilatères) ou des éléments finis 3D (par exemple, des tétraèdres ou des hexaèdres).

3. Choix des fonctions d'interpolation : Des fonctions d'interpolation sont utilisées pour approximer la solution à l'intérieur de chaque élément fini. Pour le moteur asynchrone

monophasé, les fonctions d'interpolation peuvent être choisies en fonction des équations électromagnétiques qui régissent le comportement du moteur.

4. Formulation des équations : Les équations électromagnétiques qui décrivent le comportement du moteur sont formulées sous forme de problèmes variationnels ou faibles. Cela implique généralement la multiplication des équations par des fonctions tests appropriées et l'intégration sur le domaine du moteur.

5. Assemblage du système d'équations : Le système d'équations résultant est obtenu en assemblant les contributions locales des éléments finis. Cela implique la création d'une matrice de rigidité globale et d'un vecteur de force globale, qui représentent les coefficients et les termes sources du système d'équations.

6. Conditions aux limites : Les conditions aux limites spécifiques au moteur asynchrone monophasé doivent être appliquées. Cela peut inclure des conditions de Dirichlet pour les valeurs imposées (par exemple, la tension d'alimentation), des conditions de Neumann pour les flux imposés (par exemple, les pertes dans le noyau magnétique), etc. Les conditions aux limites sont incorporées dans le système d'équations.

7. Résolution du système d'équations : Le système d'équations résultant est résolu numériquement pour obtenir les valeurs des inconnues, qui peuvent inclure les distributions de champ magnétique, les courants, les pertes, etc. Cela peut être réalisé en utilisant des techniques de résolution adaptées, telles que des méthodes itératives ou des techniques de décomposition de domaine.

8. Analyse des résultats : Une fois que les valeurs des inconnues sont obtenues, on peut analyser les résultats pour évaluer les performances du moteur asynchrone monophasé. Cela peut inclure la détermination des forces électromagnétiques, des pertes, du couple, de l'efficacité, etc..[13].

II.5 Discrétisation et approximation

L'idée fondamentale de la méthode des éléments finis est de subdiviser la région à étudier en petites sous régions appelées éléments finis constituant le maillage. Les fonctions inconnues sont approximées sur chaque élément fini par une simple fonction appelée fonction de forme qui est continue et définie sur chaque élément seul. La forme des éléments est directement liée à la dimension du problème pour une géométrie en (2D). On utilise généralement des triangles ou des quadrilatères. Pour une géométrie en (3D) on utilise des

tétraèdres, des prismes ou des hexaèdres. La discrétisation est une étape importante dans l'analyse éléments finis car la précision des résultats escomptés dépendent la méthode de discrétisation et de la finesse de cette subdivision en domaine [1].

II.6 Types d'éléments finis :

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

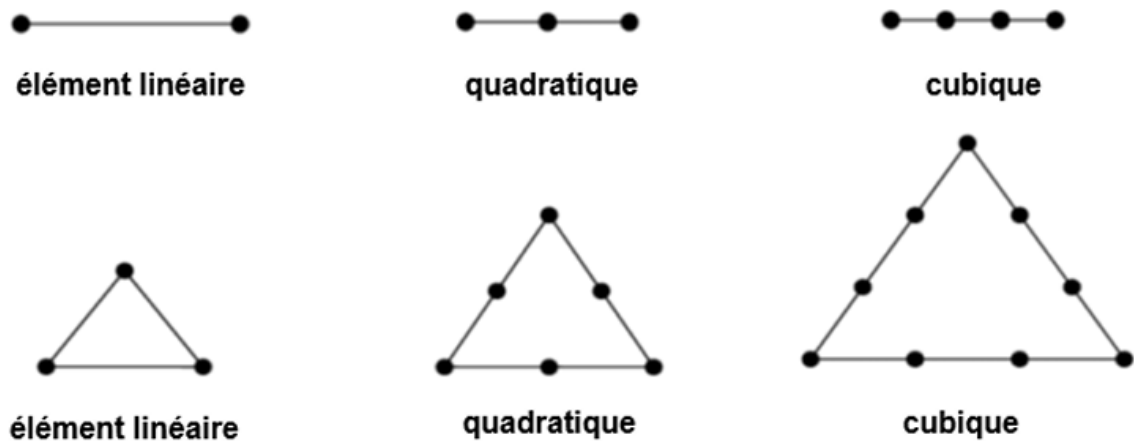


Figure II. 1 Eléments classiques en une et deux dimensions.

II.7 Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis

II.7.1 Avantages

- Adaptation aux géométries complexes.
- Prise en compte des non linéarités accrues.

II.7.2 Inconvénients

- Mise en œuvre relativement difficile.
- Prise en considération de domaines infinis.
- Présence de singularités dans le domaine d'étude.
- Temps de calcul relativement important [14].

II.8 Conclusion :

La conclusion du chapitre sur l'électromagnétisme et les équations de Maxwell consiste à écrire le champ magnétique en utilisant des équations spécifiques. Cette procédure améliore notre compréhension des interactions que décrivent les équations de Maxwell. Les équations de Maxwell sont résolues numériquement en appliquant la méthode des éléments finis, qui offre un mécanisme pour modéliser les processus électromagnétiques. Les chercheurs peuvent examiner et prévoir les impacts électromagnétiques dans diverses situations en utilisant ces techniques. Dans l'ensemble, le chapitre offre une revue complète des fondamentaux et des applications de l'électromagnétisme, soulignant l'importance des équations de Maxwell et des calculs par éléments finis dans la compréhension et la prévision des interactions électromagnétiques [12].

Chapitre III

Conception De La Machine Asynchrone

III.1 Présentation du logiciel :

III.1.1 ANSYS Maxwell :

ANSYS Maxwell est le logiciel de simulation de champ électromagnétique leader de l'industrie pour la conception et l'analyse de moteurs électriques, d'actionneurs, de capteurs, de transformateurs et d'autres dispositifs électromagnétiques et électromécaniques. Avec Maxwell, vous pouvez caractériser précisément le mouvement transitoire non linéaire des composants électromécaniques et leurs effets sur le circuit de commande et la conception du système de commande. En tirant parti des solveurs de champs électromagnétiques avancés de Maxwell et en les reliant de façon transparente à la technologie de simulation de circuits intégrés et de systèmes, vous pouvez comprendre les performances des systèmes électromécaniques longtemps avant de construire un prototype en matériel. Ce laboratoire électromagnétique virtuel vous donne un avantage concurrentiel important avec des délais de mise sur le marché plus courts, des coûts réduits et des performances système améliorées.

Maxwell inclut les solveurs suivants :

- Transitoire magnétique avec mouvement rigide.
- AC électromagnétique.
- Magnétostatique.
- Électrostatique.
- Conduction DC.
- Transitoire électrique.
- Interfaces de conception experte pour les machines électriques et les transformateurs.
- ANSYS S'implorer Entry (simulation de circuit et de système) [15].

III.1.2 Maxwell 2D

Flux2D/3D est un logiciel de simulation numérique utilisé en conception assistée par ordinateur. Il utilise la méthode des éléments finis et permet le calcul des états magnétiques, électriques ou thermiques des dispositifs en régimes permanents, transitoires et harmoniques, avec des fonctionnalités d'analyse multiple-paramétriques étendues, les couplages circuit et cinématique. Ceci nécessite la résolution d'équations diverses : équations de Maxwell, de la chaleur, loi de comportement des matériaux. De par la difficulté de la résolution simultanée de ces équations, le code est découpé en un ensemble de modules chargés de résoudre chacun un type de problème donné (c'est-à dire les équations à utiliser et les hypothèses associées). Simulation du champ magnétique sur un actionneur à l'aide de Flux3D Flux est développée

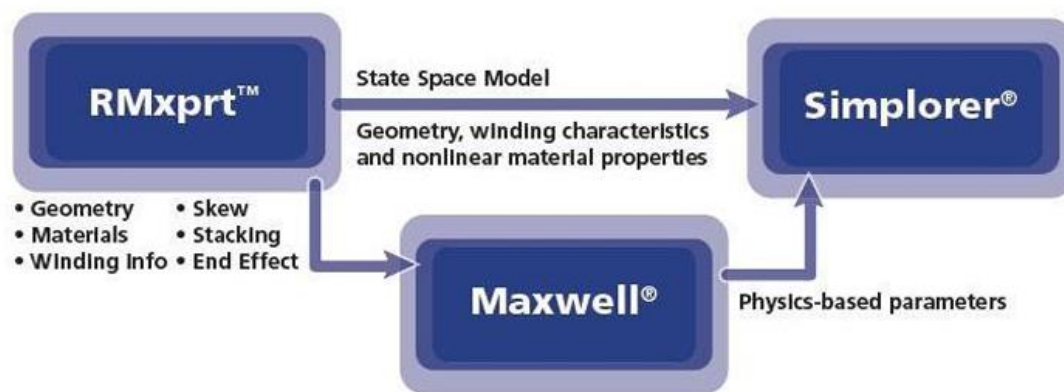
(en collaboration avec le G2ELab, fusion du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, du Laboratoire d'Electrostatique et Matériaux Diélectriques et du Laboratoire de Magnétisme du Navire) et distribué en France par la société CEDRATS.A [15].

III.1.3 Maxwell 3D

Maxwell 3D permet la simulation et l'analyse de composants électromagnétiques et électromécaniques hautes performances communs aux applications automobiles, militaires / aérospatiales et industrielles. Maxwell fournit aux utilisateurs un laboratoire virtuel pour étudier les champs électromagnétiques statiques, fréquentiels et variables dans le temps dans des structures complexes [15].

III.1.4 RMX prt

Le RMX prt 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 peut trouver des géométries similaires à celle souhaité dont il se fait juste d'apporter les modifications qu'il faut (les paramètres de la machine, le type de la géométrie), ce qui nous permettras de requiert [15].



III.2

Figure III. 1 Chaîne de simulation électromagnétique ANSYS

III.2.1 Application Consacrer Moteur asynchrone triphasé avec 28 barres rotoriques

III.2.1.1 Présentation les Différents paramètres du moteur

1. Les paramètres du moteur sont présentés dans le tableau III.1 ci-dessous

Tableau III. 1 Paramètres généraux du moteur

Nom	Valeur	Unité
Type de la machine électrique	Triphasée	–
Nombre de pôles	4	–
Coefficient de perte supplémentaire	0.01	–
Pertes par frottement(mécanique)	0	W
Pertes par ventilation	0	W
Vitesse de référence	1430	tr/min

2. Les paramètres généraux du stator sont présentés dans le tableau III.2 ci-dessous

Tableau III. 2 Paramètres généraux du stator

Nom	Valeur	Unité
Le nombre d'encoches du stator	36	–
Diamètre extérieur	230	mm
Diamètre intérieur	145	mm
Longueur de Stator	175	mm
Facteur d'empilement	0.95	–
Type de d'acier	M19_24G	–
Type de l'encoche	3	–

3. Les paramètres des encoches statoriques sont présentés dans le tableau III.3 ci-dessous

Tableau III. 3 Paramètres généraux des encoches du stator

Nom	Valeur	Unité
Hs0	1	mm
Hs1	2	mm
Hs2	0	mm
Bs0	3.5	mm
Bs1	0	mm
Bs2	0	mm
Rs	3	mm

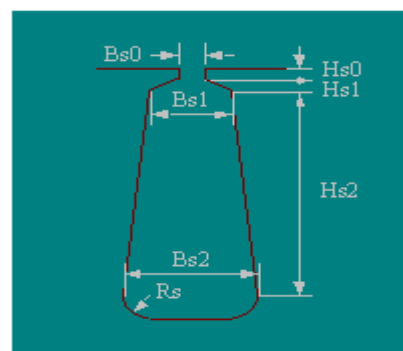


Figure III. 2 Type d'encoche du stator

4. Les paramètres de l'enroulement statorique sont présentés dans le tableau III.4 ci-dessous

Tableau III. 4 Paramètres généraux de l'enroulement du stator

Nom	Valeur	Unité
Nombre de couche	2	—
Type d'enroulement	WholeCoiled	—
Nombre de branches parallèles	1	—
Nombre de conducteurs par encoche	48	—
Coil Pitch	8	—
Nombre de brins	1	—
Diamètre du fil nu	Diameter: 1.06	mm

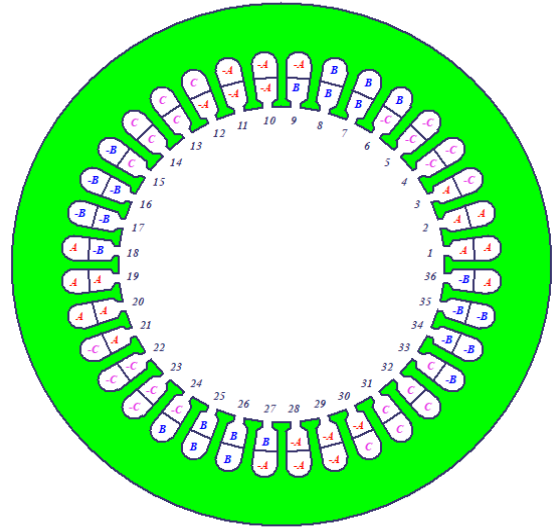


Figure III. 3 Géométrie du stator

5. Les paramètres généraux du rotor sont présentés dans le tableau III.5 ci-dessous

Tableau III. 5 Paramètres généraux du rotor

Nom	Valeur	Unité
Facteur d'empilement	0.95	—
Nombre d'encoches	28	—
Type d'encoche	1	—
Diamètre extérieur	144.2	mm
Diamètre intérieur	45	mm
Longueur	175	mm
Type du matériau	M19_24G	—
Inclinaison des encoches	0	—

6. Les paramètres des encoches rotoriques sont présentés dans le tableau III.6 ci-dessous

Tableau III. 6 Paramètres généraux des encoches du rotor

Nom	Valeur	Unité
Hs0	1	mm
Hs01	0	mm
Hs2	18	mm
Bs0	3	mm
Bs1	7.21	mm
Bs2	7.2	mm

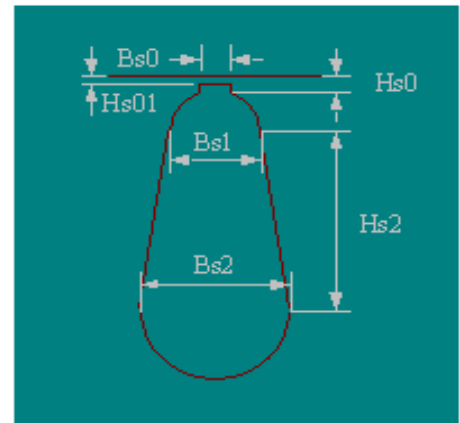


Figure III. 4 Type d'encoche du rotor

7. Les paramètres généraux des barres rotoriques sont présentés dans le tableau III.7 ci-dessous

Tableau III. 7 Paramètres généraux des barres rotoriques

Nom	Valeur	Unité
Matériau des barres	Aluminium	–
Longueur de l'extrémité	20	mm
Longueur de l'extrémité de l'anneau	18	mm
Hauteur de l'extrémité de l'anneau	18	mm
Matériau de l'anneau	Aluminium	–

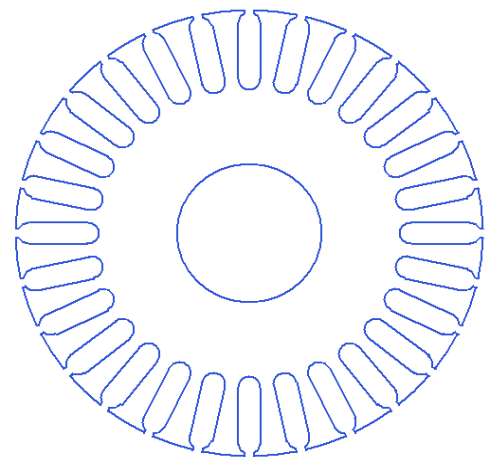


Figure III. 5 Géométrie du rotor

La figure III.6 présente notre conception du moteur asynchrone dans l'outil RMX prt

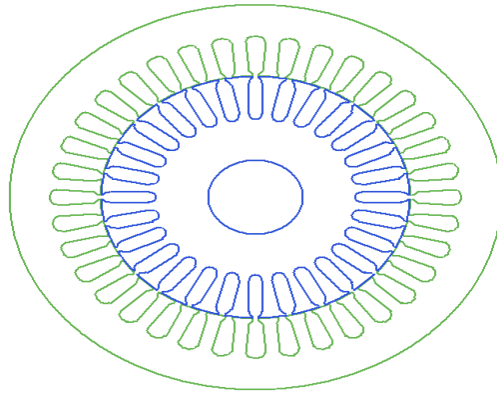


Figure III. 6 Conception de moteurs à induction dans Rmxprt

8. Ce moteur asynchrone est caractérisé par les grandeurs nominales présentées dans le tableau III. 8 suivants :

Tableau III. 8 Paramètres de la machine

Nom	Valeur	Unité
Puissance	7500	W
Tension	400	V
Vitesse	1430	tr/min
Fréquence	50	Hz
Température de fonctionnement	75	°C

III.2.1.2 Présentation de la distribution champ magnétique du moteur étudié

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.

La figure (III-7) présente la géométrie sous Maxwell-2D du moteur étudié :

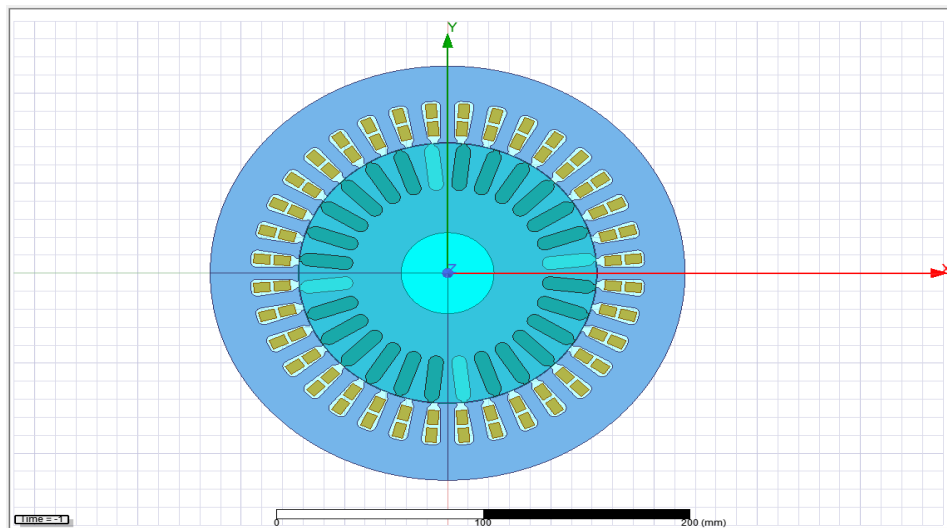


Figure III. 7 Géométrie 2D réduite de la machine asynchrone étudiée

Par ailleurs, Maxwell-2D permet le maillage de la géométrie réduite du moteur étudié (voir figure III-8).

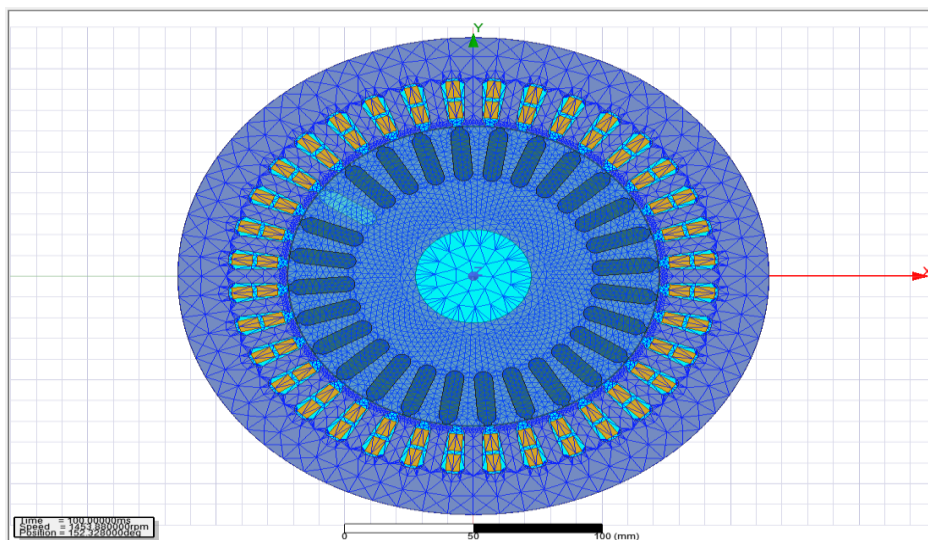


Figure III. 8 Maillage de la géométrie 2D réduite du moteur

Le nombre total d'éléments de maillage est de 12876 éléments.

La figure ci-dessous représente les lignes de flux (voir figure III-9).

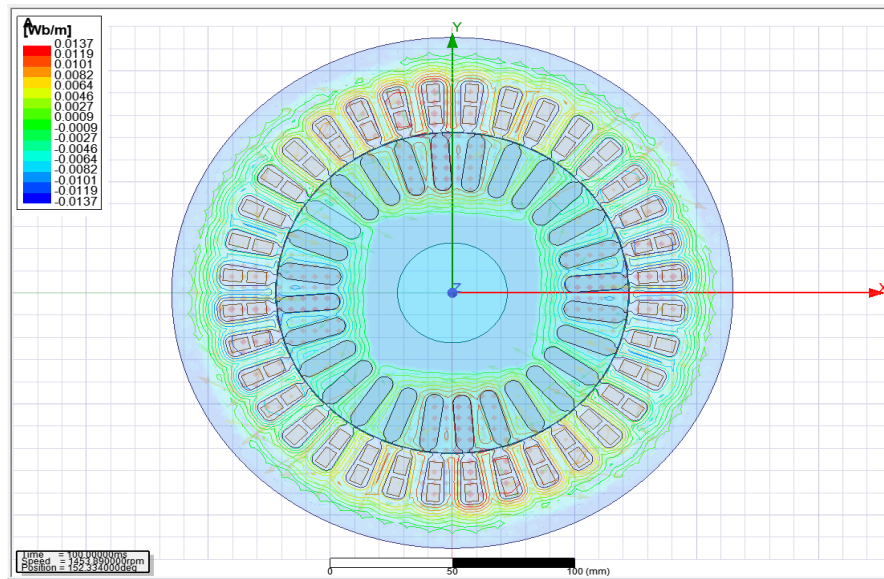


Figure III. 9 Flux de la géométrie 2D

La figure ci-dessous représente l'induction magnétique (voir figure III-10).

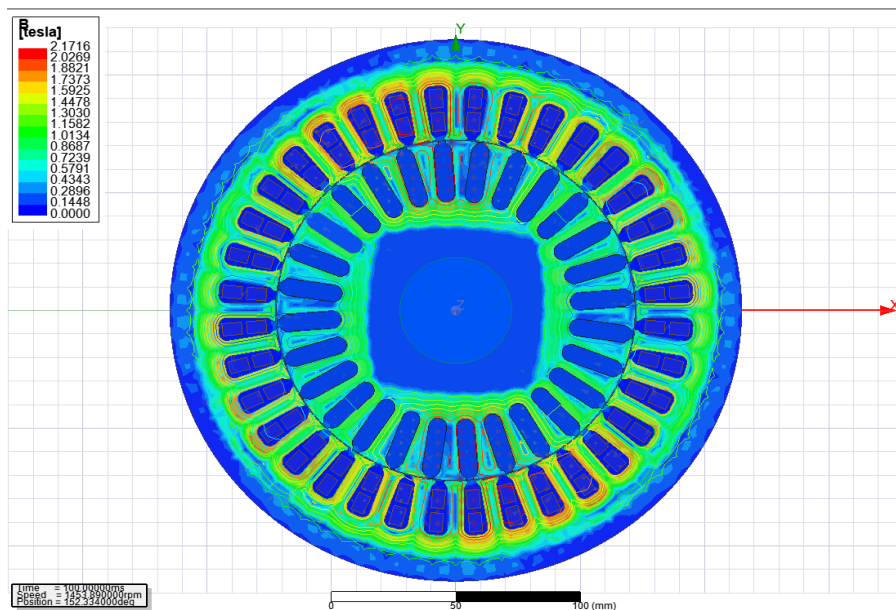


Figure III. 10 Induction magnétique

III.2.1.3 Présentation les Performances du moteur étudié

Après la simulation sous Logiciel Ansys nous avons obtenus les résultats sous formes des courbes suivantes qui représentent des caractéristiques statiques de la machine conçue tels que le couple électromagnétique, le courant de phase statorique et le rendement en fonction de la vitesse.

Les figures (III-11), (III-12), (III-13) et (III-14) représentent les performances du moteur sous forme graphique.

La figure III-11 représente le couple en fonction de la vitesse.

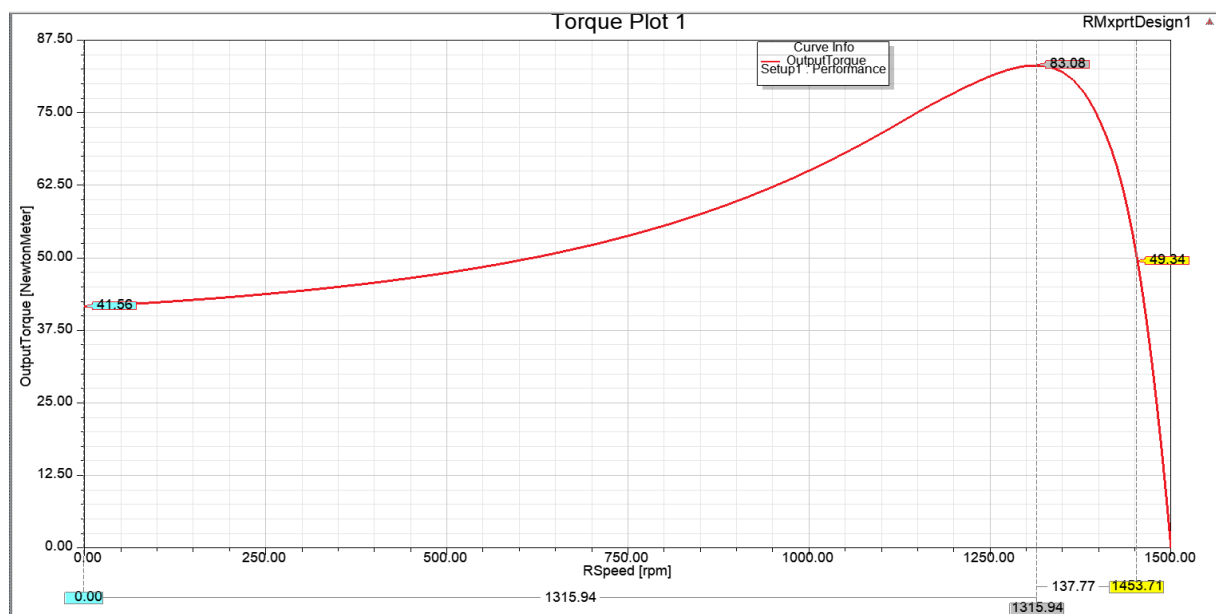


Figure III. 11 Couple en fonction de la vitesse

La figure III-12 représente le courant en fonction de la vitesse.

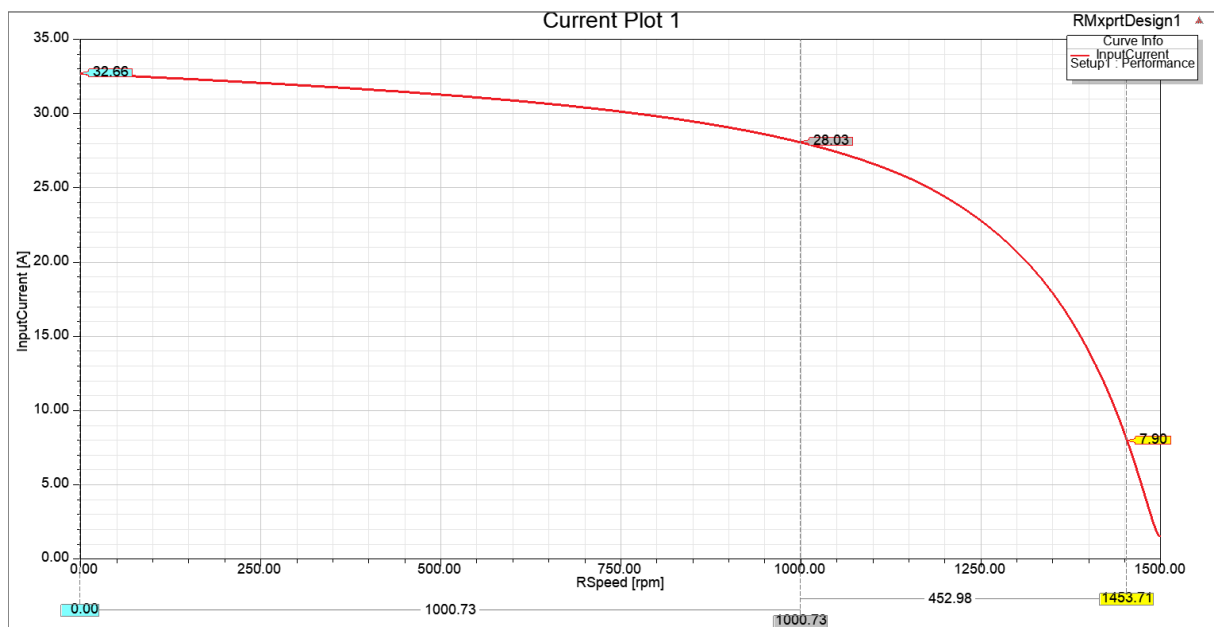


Figure III. 12 Courant en fonction de la vitesse

La figure III-13 représente le rendement en fonction de la vitesse.

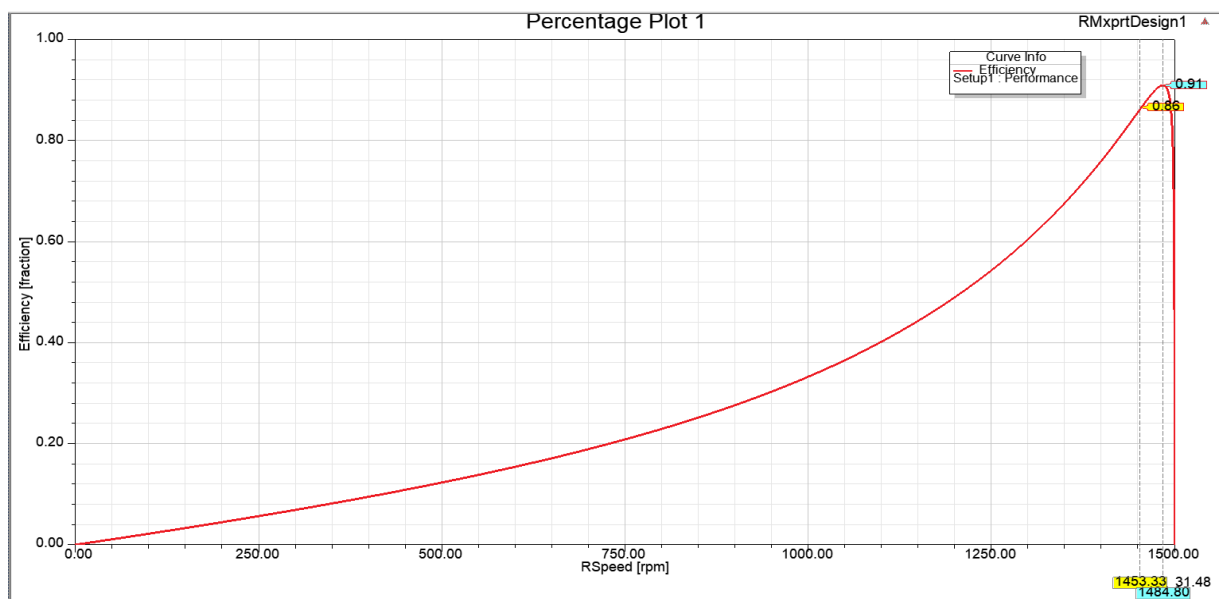


Figure III. 13 Rendement en fonction de la vitesse

La figure III-14 représente la puissance utile en fonction de la vitesse.

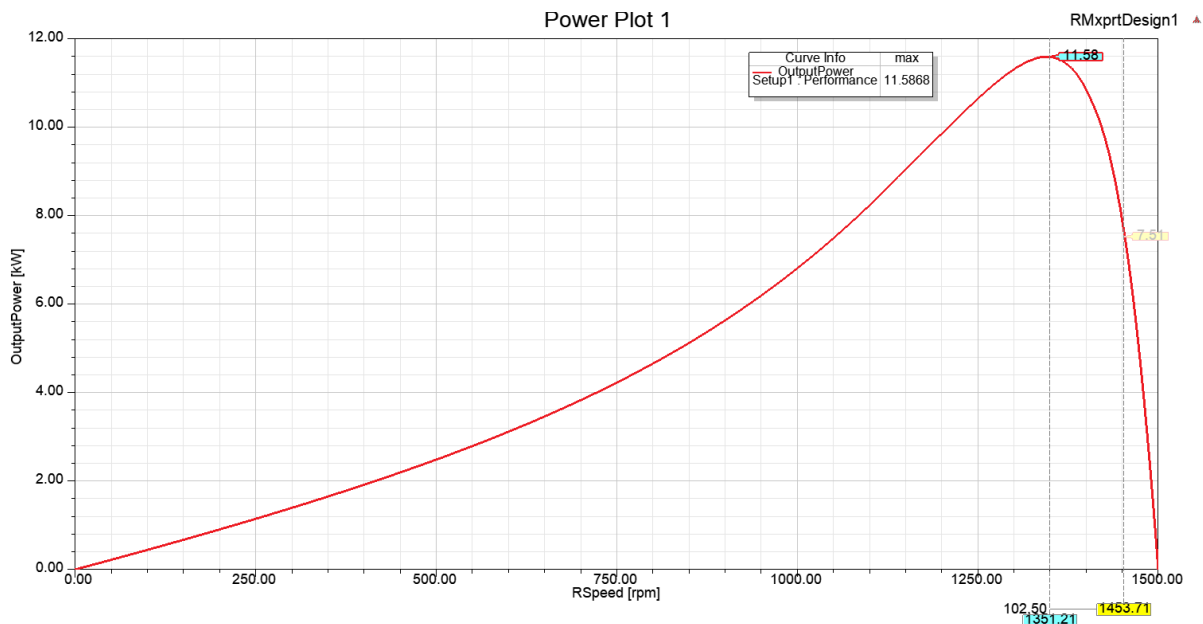


Figure III. 14 Puissance utile en fonction de la vitesse

III.2.1.4 Interprétation des Résultats d'analyse par RMxprt

III.2.1.4.1 Courbe de l'évolution du couple en fonction de la vitesse

On observe sur la courbe (figure III-11) qu'à la vitesse de rotation $n=0$, le couple de démarrage est de 41.56 Nm. On constate également que le couple augmente avec la vitesse. Il atteint sa valeur maximale de 83.08 Nm à la vitesse 1315.94 tr /min, puis diminue rapidement jusqu'à s'annuler à la vitesse de synchronisme.

III.2.1.4.2 Courbe de l'évolution du Courant en fonction de la vitesse

On observe sur la courbe (figure III-12) une diminution du courant en fonction du temps. En fonctionnement, à la vitesse de rotation $n=0$, le courant atteint sa valeur maximale de 32.66 A. On note également une légère diminution du courant lorsque la vitesse augmente, due à la réduction du glissement et à la diminution de la force électrique induite dans le rotor. À la vitesse 1000 tr /min, on observe une chute de courant très rapide.

III.2.1.4.3 Courbe du rendement en fonction de la vitesse

On constate que le rendement de la machine asynchrone à cage est nettement bon, comme en témoigne l'augmentation de la vitesse et du rendement qui atteint 1 453.33 tr /min, soit un rendement de 0.86 %, valeur représentée dans le tableau III.9. Le rendement atteint

ensuite une valeur maximale de 1484.80 tr /min, correspondant à un rendement de 0.91%, Et puis ça chute rapidement. (Figure III-13)

III.2.1.4.4 Courbe de la puissance en fonction de la vitesse

Le document représente la variation de puissance en fonction de la vitesse (Figure III-14). On observe sur la courbe une augmentation de la vitesse jusqu'à une valeur maximale de 11,58 Kw, suivie d'une diminution jusqu'à 7,51 Kw à 1453.71 tr/min. Projetée sur l'axe des vitesses, la courbe obtenue correspond presque parfaitement à celle issue de la simulation (réalisée à l'aide d'un programme RMxpert). Ceci confirme la précision des résultats présentés dans le tableau. La diminution se poursuit jusqu'à s'annuler à une vitesse de 1500 tr /min.

Nous résumons les performances du moteur sous le tableau III. 9

Tableau III. 9 Résultats obtenus

Nom	Valeur	Unité
Perte du Stator	801324	mW
Perte du Rotor	237926	mW
Perte dans le Fer	59632.5	mW
Perte par Frottement et Ventilation	0	mW
Perte Parasite	75000	mW
Perte Totale	1173880	mW
Puissance de Sortie	7500110	mW
Puissance d'entrée	8674000	mW
Rendement	86.4666	%
Facteur de Puissance	0.909767	—
Couple Nominal	49.2619	Nm
Vitesse Nominale	1453.88	tr /min
Glissement Nominal	0.0307476	—
Courant de phase du stator	7876.56	mA
Courant de phase du rotor	7464.73	mA

III.2.2 Application Consacrer Moteur asynchrone triphasé avec 48 barres rotoriques

III.2.2.1 Présentation les Différents paramètres du moteur

Pour le moteur asynchrone triphasé avec 48 barres, nous maintiendrons les paramètres du stator et les encoches pour le moteur 28 barres.

Nous allons modifier à la fois le rotor et les encoches et les barres générales du rotor.

- 1 Les paramètres généraux du rotor sont présentés dans le tableau III.10 ci-dessous

Tableau III. 10 Paramètres généraux du rotor

Nom	Valeur	Unité
Facteur d'empilement	0.95	–
Nombre d'encoches	48	–
Type d'encoche	1	–
Diamètre extérieur	144.2	mm
Diamètre intérieur	45	mm
Longueur	175	mm
Type du matériau	M19_24G	–
Inclinaison des encoches	0	–

- 2 Les paramètres des encoches rotoriques sont présentés dans le tableau III.11 ci-dessous

Tableau III. 11 Paramètres généraux des encoches du rotor

Nom	Valeur	Unité
Hs0	1	mm
Hs01	0	mm
Hs2	12	mm
Bs0	3	mm
Bs1	4.81	mm
Bs2	4.8	mm

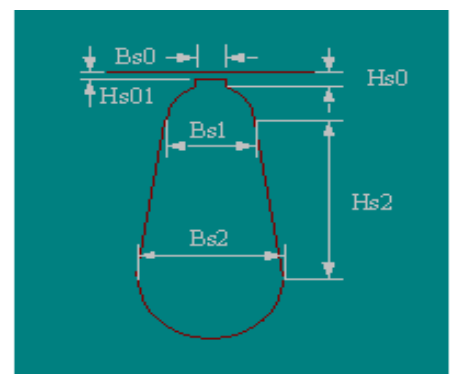


Figure III. 15 Type d'encoche du rotor

- 3 Les paramètres généraux des barres rotoriques sont présentés dans le tableau III.12 ci-dessous

Tableau III. 12 Paramètres généraux des barres rotoriques

Nom	Valeur	Unité
Matériau des barres	Aluminium	–
Longueur de l'extrémité	20	mm
Longueur de l'extrémité de l'anneau	14	mm
Hauteur de l'extrémité de l'anneau	14	mm
Matériau de l'anneau	Aluminium	–

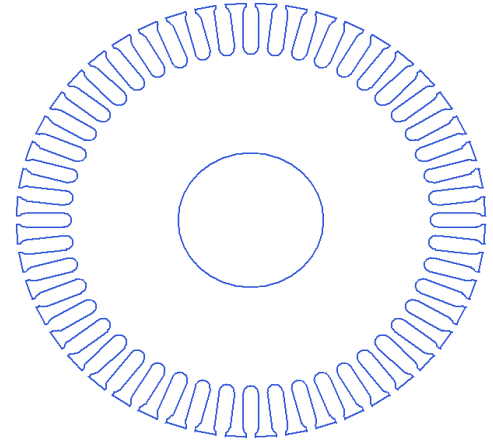


Figure III. 16 Géométrie du rotor

La figure III-17 présente notre conception du moteur asynchrone dans l'outil RMX prt

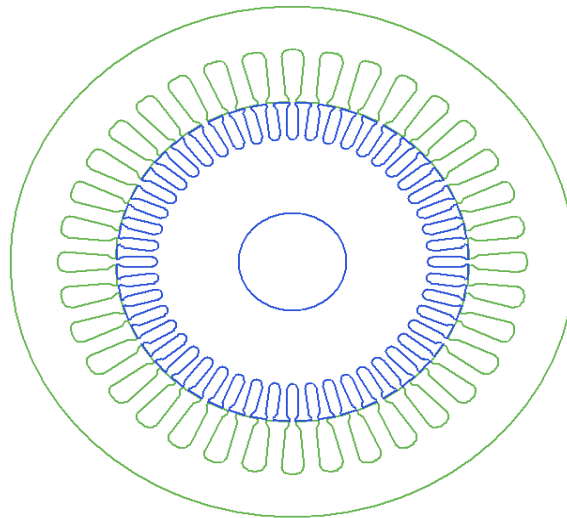


Figure III. 17 Conception de moteurs à induction dans Rmxprt

III.2.2.2 Présentation de la distribution champ magnétique du moteur étudié

La figure III-18 présente la géométrie réduite et importée sous Maxwell-2D du moteur étudié :

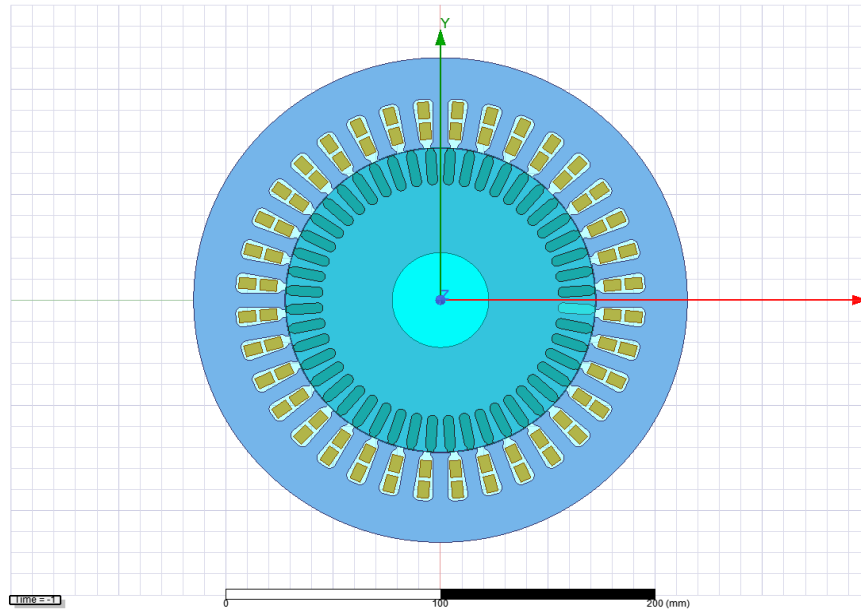


Figure III. 18 Géométrie 2D réduite de la machine asynchrone étudiée

La figure III-19 présente le maillage de la machine étudié sous Maxwell-2D

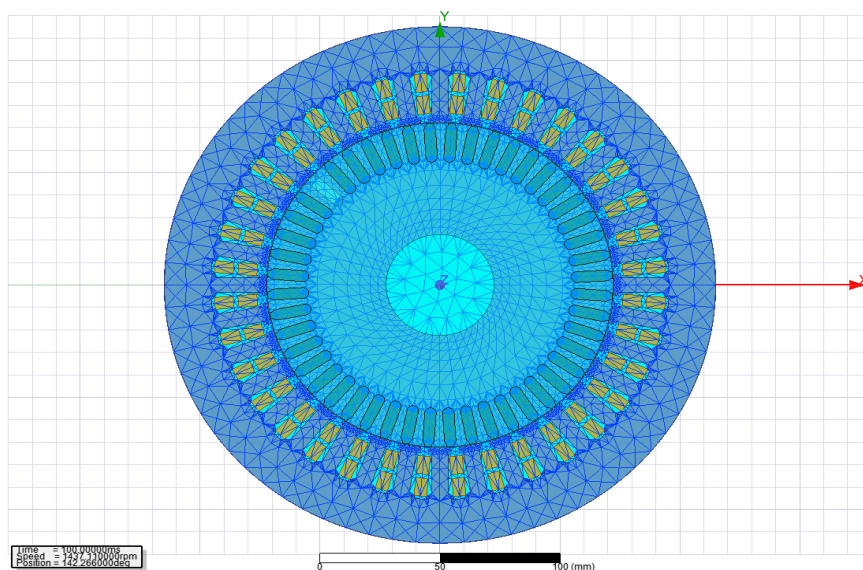


Figure III. 19 Maillage de la géométrie 2D réduite du moteur

Le nombre total d'éléments de maillage est de 10838 éléments.

La figure III-20 ci-dessous représente les lignes de flux.

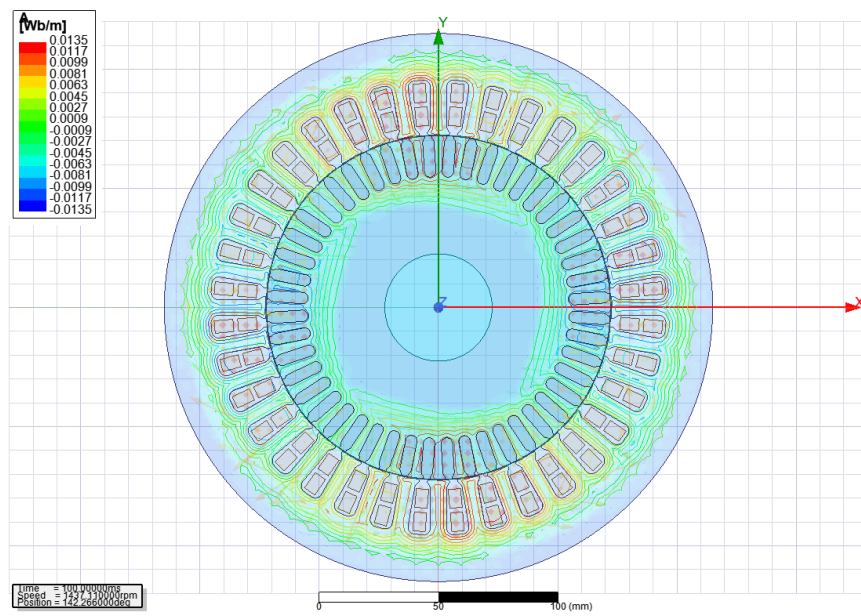


Figure III. 20 Flux de la géométrie 2D

La figure III-21 ci-dessous représente l'induction magnétique.

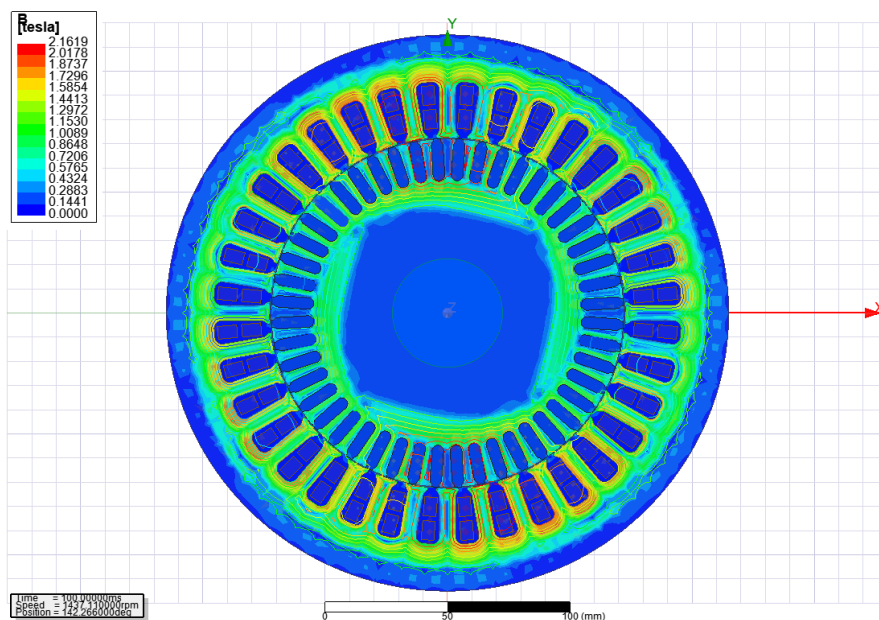


Figure III. 21 Induction magnétique

III.2.2.3 Présentation les Performances du moteur étudié

Après la simulation sous Logiciel Ansys nous avons obtenus les résultats sous formes des courbes suivantes qui représentent des caractéristiques statiques de la machine conçue tels que le couple électromagnétique, le courant de phase statorique et le rendement en fonction de la vitesse.

Les figures (III-22), (III-23), (III-24), (III-25), représentent les performances du moteur sous forme graphique.

La figure III-22 représente le couple en fonction de la vitesse.

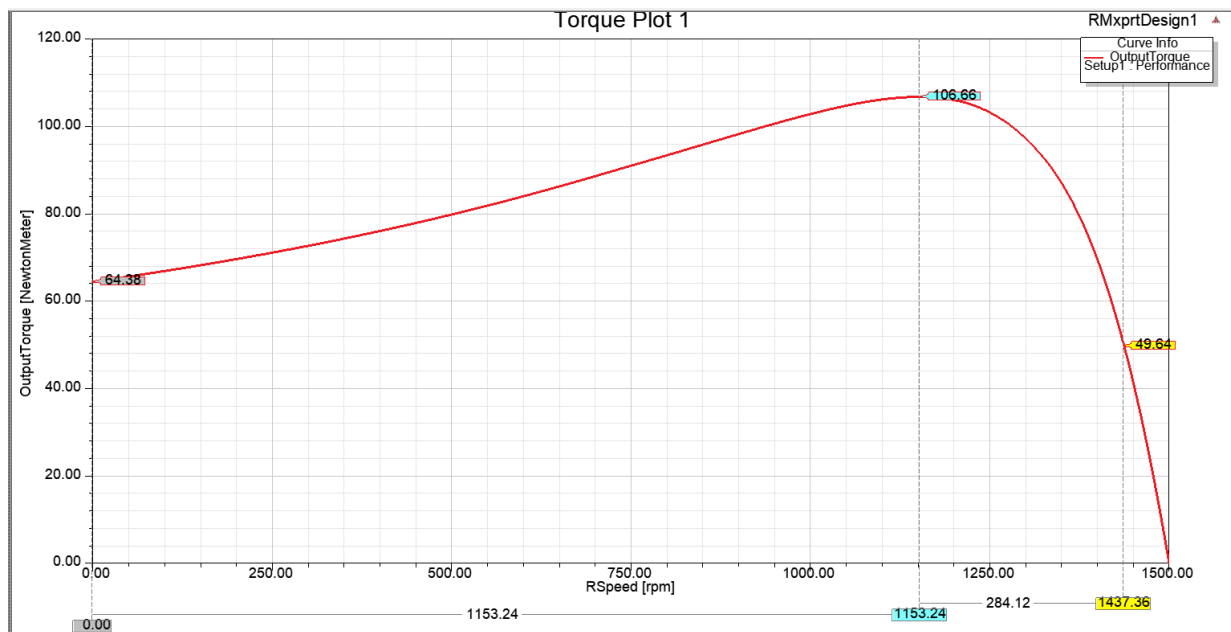


Figure III. 22 Couple en fonction de la vitesse

La figure III-23 représente le courant en fonction de la vitesse.

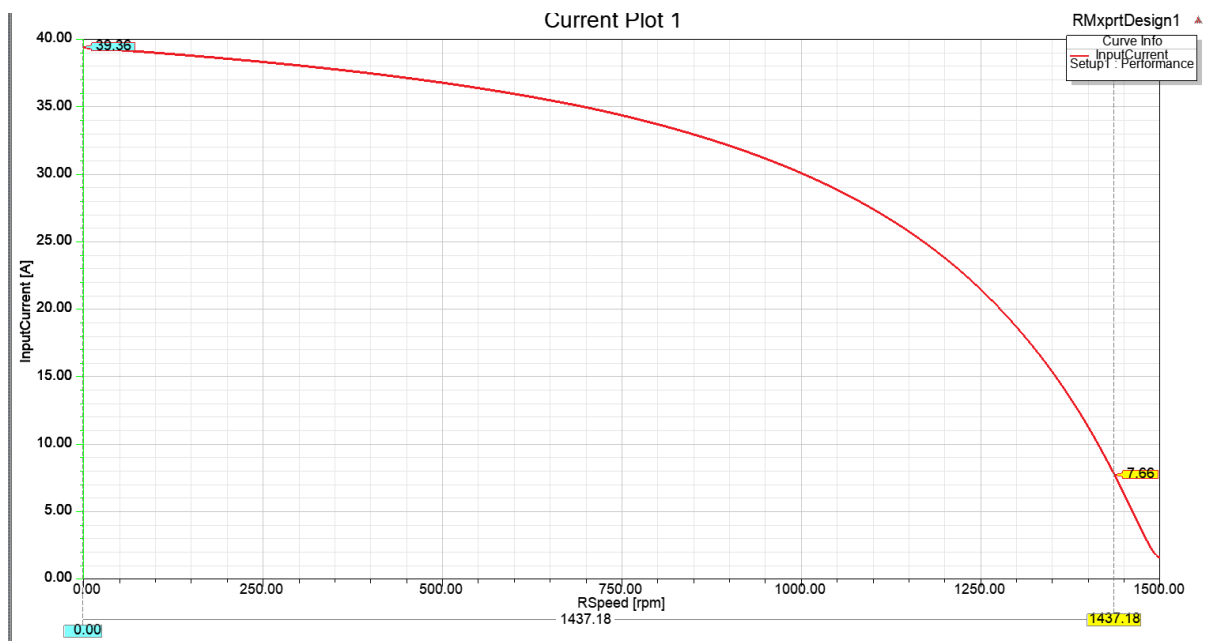


Figure III. 23 Courant en fonction de la vitesse

La figure III-24 représente le rendement en fonction de la vitesse.

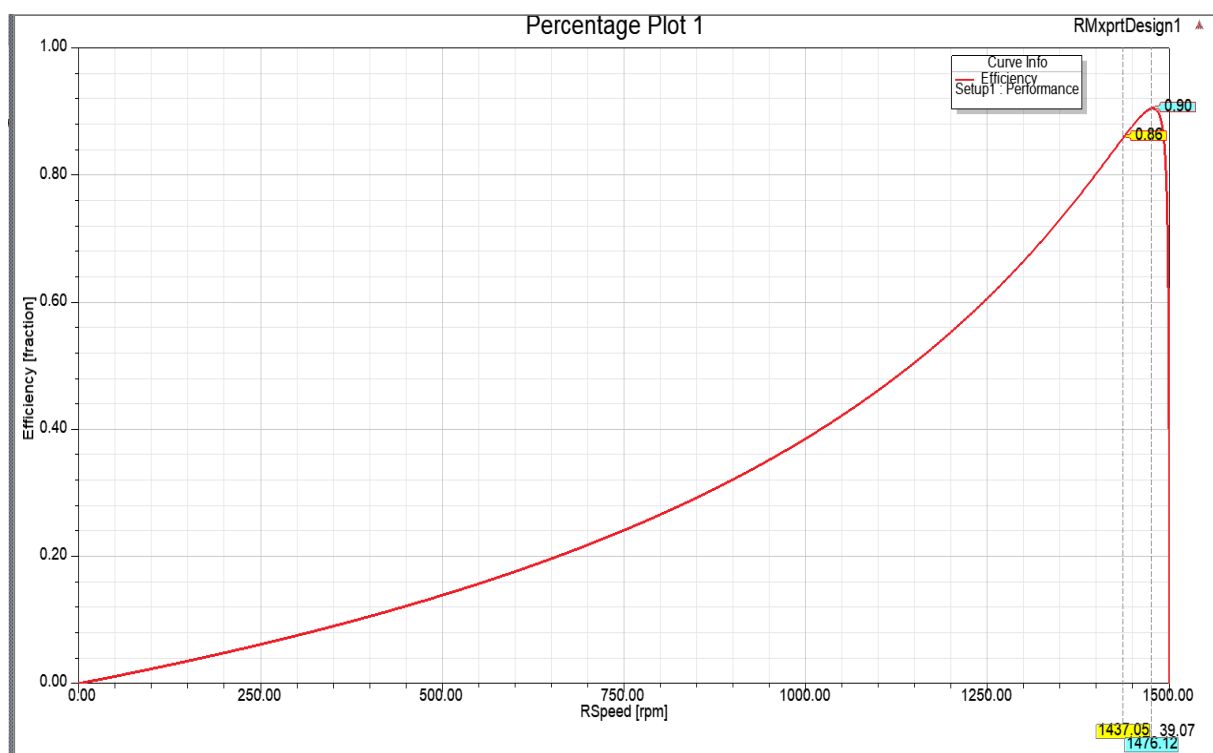


Figure III. 24 Rendement en fonction de la vitesse

La figure III-25 représente la puissance utile en fonction de la vitesse.

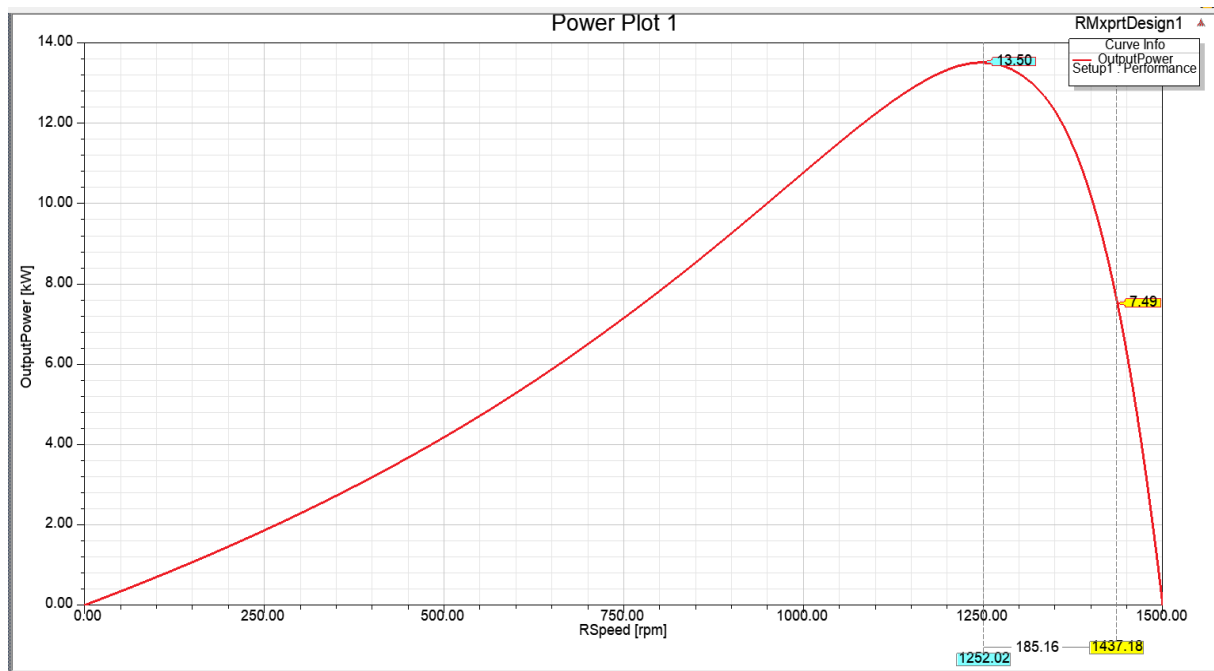


Figure III. 25 Puissance utile en fonction de la vitesse

III.2.2.4 Interprétation des Résultats d'analyse par RMxprt

III.2.2.4.1 Courbe de l'évolution du couple en fonction de la vitesse

La figure III-22 illustre les variations de couple en fonction de la vitesse, en présentant la partie de transitoire et la partie de régime permanent. À l'arrêt (vitesse de rotation nulle $n=0$), le couple (démarrage de moteur) est de 64.38 Nm. Lorsque la vitesse augmente, le couple augmente également, atteignant une valeur maximale de 106.66 Nm, correspondant à 1153.24 tr/min à la vitesse de synchronisme.

III.2.2.4.2 Courbe de l'évolution du Courant en fonction de la vitesse

On constate que le courant figure III-23 de démarrage est 3 à 5 fois plus grand que le courant nominal et c'est dû au couple de démarrage qui est important, cette caractéristique on la retrouve sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone et qu'on appelle courant d'appel, il est utilisé pour vaincre le couple résistant dû aux frottements et le couple résistant de l'inertie de la machine. Par la suite le courant est d'autant plus petit que la vitesse est plus grande.

III.2.2.4.3 Courbe du rendement en fonction de la vitesse

On constate que le rendement figure III-24 de la machine asynchrone à cage est nettement bon, comme en témoigne l'augmentation de la vitesse et du rendement qui atteint 1 437.05 tr /min, soit un rendement de 0.86 %, valeur représentée dans le tableau 13. Le rendement atteint ensuite une valeur maximale de 1476.12 tr /min, correspondant à un rendement de 0.90%, Et puis ça chute rapidement.

III.2.2.4.4 Courbe de la puissance en fonction de la vitesse

La figure représente la variation de puissance en fonction de la vitesse figure III-25. On observe sur la courbe une augmentation de la vitesse jusqu'à une valeur maximale de 13,50 Kw à 1252.02 tr/min, suivie d'une diminution jusqu'à 7,49 Kw à 1437.18 tr/min. Projetée sur l'axe des vitesses, la courbe obtenue correspond presque parfaitement à celle issue de la simulation (réalisée à l'aide d'un programme RMxprt). Ceci confirme la précision des résultats présentés dans le tableau 13. La diminution se poursuit jusqu'à s'annuler à une vitesse de 1500 tr /min.

Le tableau III.13 ci-dessous donne certains paramètres et performances du moteur

Tableau III. 13 Résultats obtenus en simulant avec RMxprt. (Rated Performance)

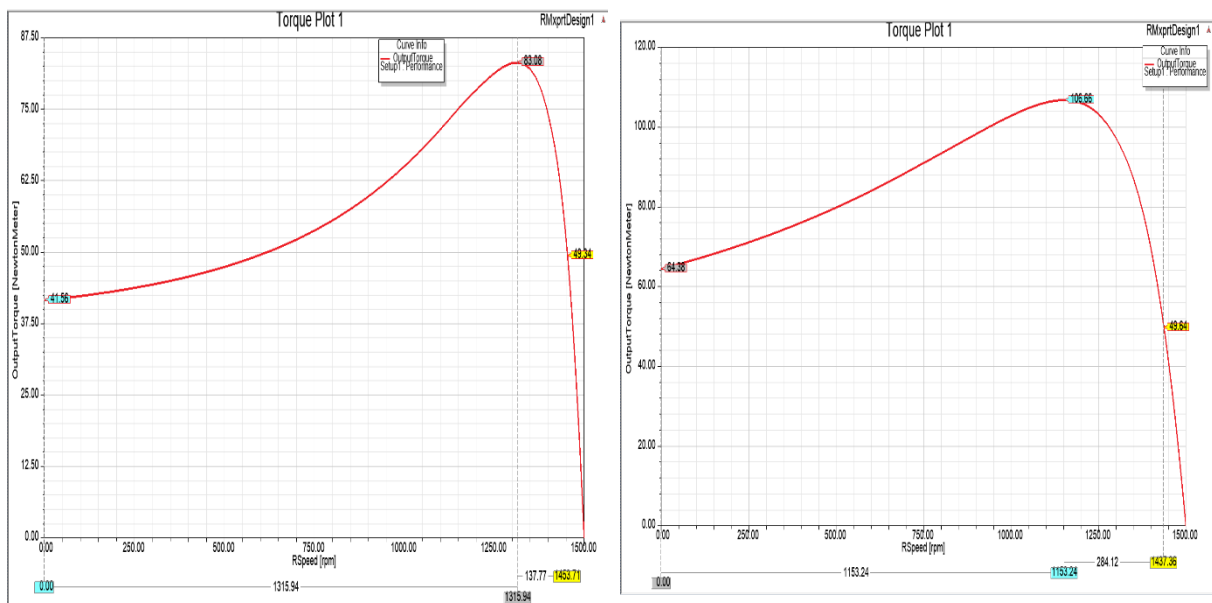
Nom	Valeur	Unité
Perte du Stator	760779	mW
Pert du Rotor	328202	mW
Perte dans le Fer	60895.7	mW
Perte par Frottement et Ventilation	0	mW
Perte Parasite	75000	mW
Perte Totale	1224880	mW
Puissance de Sortie	7499340	mW
Puissance d'entrée	8724220	mW
Rendement	85.96	%
Facteur de Puissance	0.939148	—
Couple Nominal	49.8317	Nm
Vitesse Nominale	1437.11	tr /min

Glissement Nominal	0.0419291	—
Courant de phase du stator	7674.7	mA
Courant de phase du rotor	7359.36	mA

III.3 Comparaison entre Moteur asynchrone triphasé avec 28 barres rotoriques et 48 barres rotoriques

III.3.1 Couples 28 barres VS couple 48 barres

La Figure III. 26 représente les couples en fonction de la vitesse.



a) Couple en fonction de la vitesse 28 barres

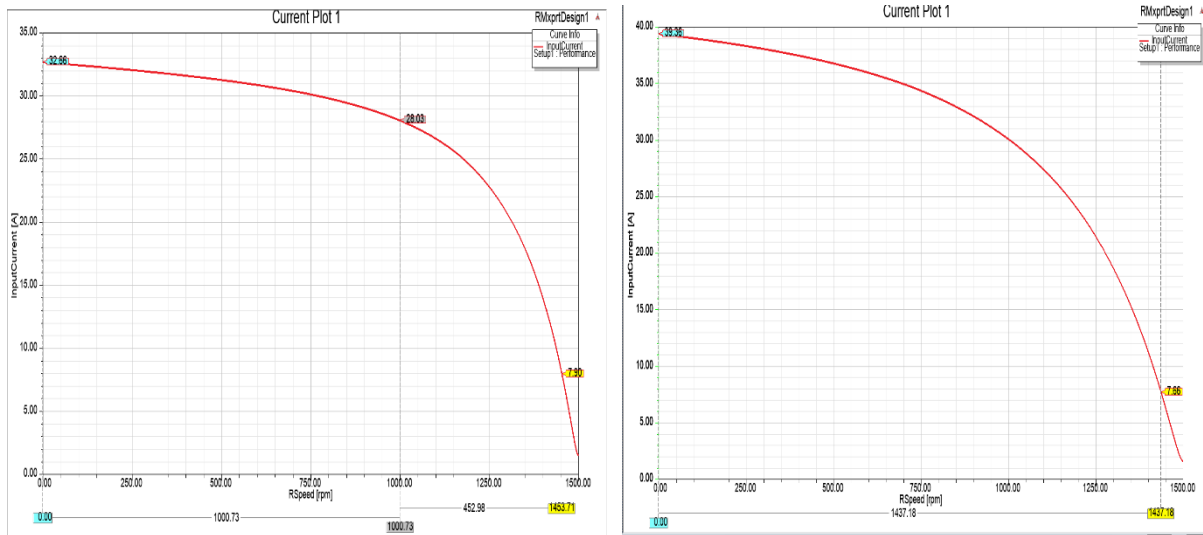
b) Couple en fonction de la vitesse 48 barres

Figure III. 26 Couple en fonction de la vitesse

La figure III. 26 dans la configuration 28 barres le couple démarrage est 41.56 Nm par contre dans la configuration 48 barres cette valeur augmente à 64.38 donc différence de pourcentage 54.91% entre la conception de moteur. En même temps la courbe qui montre l'ondulation de couple en utilisant toujours le Maxwell 2D et comparer dans le couple 48 barres d'après la conception la configuration 28 montre une ondulation de couple et très faible par rapport à la conception de 48.

III.3.2 Courant 28 barres VS courant 48 barres

La Figure III-27 représente les courants en fonction de la vitesse



a) Courant en fonction de la vitesse 28 barre

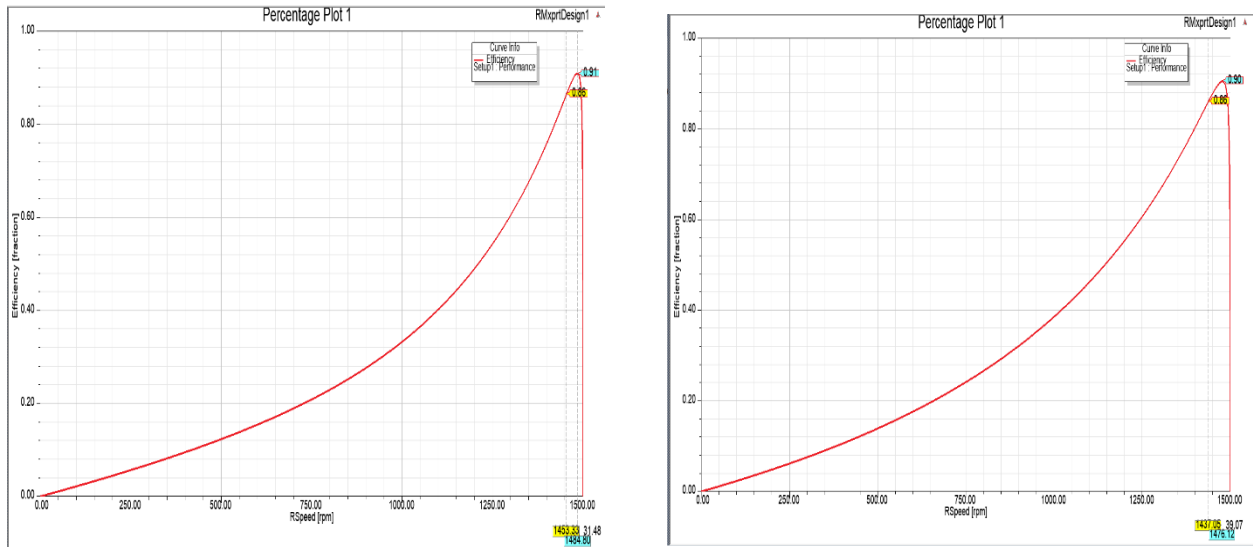
b) Courant en fonction de la vitesse 48 barres

Figure III. 27 Courant en fonction de la vitesse

La figure III-27 présentent une courbe illustrant l'évolution du courant en fonction de la vitesse de rotation pour un moteur asynchrone triphasé à 28 rotors et un autre à 48 rotors. Dans chaque configuration, à la vitesse de rotation considérée, le courant de démarrage (qui atteint simultanément sa valeur maximale) est de 32.66 A pour la configuration à 28 rotors et de 39.36 A pour celle à 48 rotors. Ceci représente une différence relative de 21.43% entre les deux moteurs, et l'on observe une diminution de ces valeurs lorsque la vitesse augmente.

III.3.3 Rendement 28 barres VS rendement 48 barres

La Figure III- 28 représente les rendements en fonction de la vitesse



a) Rendement en fonction de la vitesse 28 barres

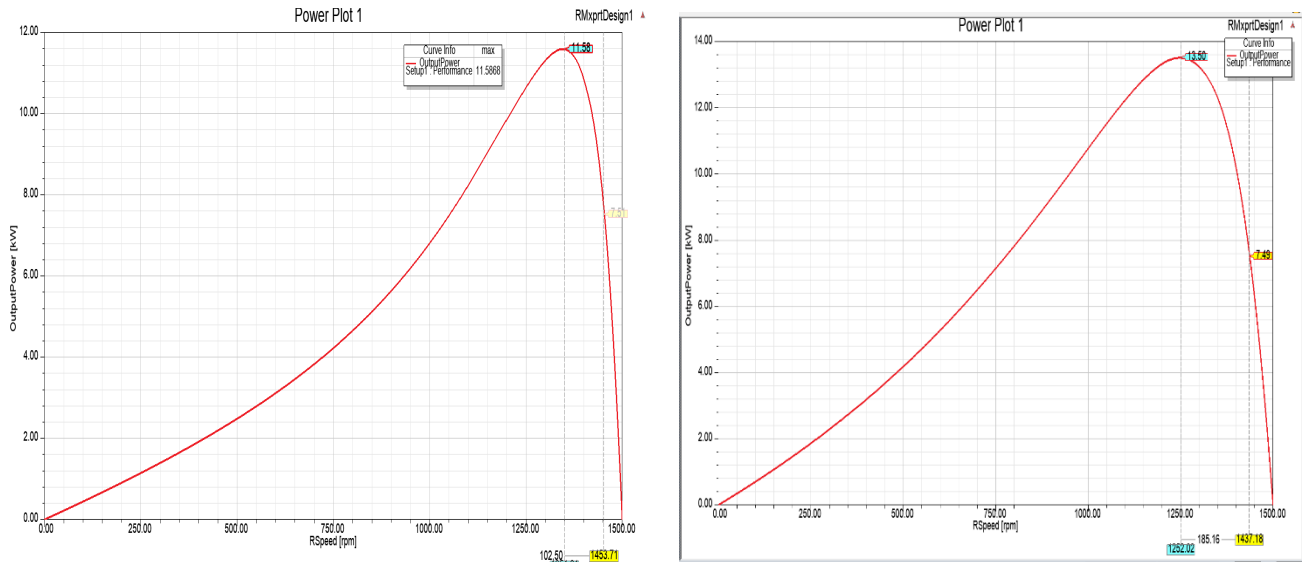
b) Rendement en fonction de la vitesse 48 barres

Figure III. 28 Rendement en fonction de la vitesse

La figure III-28 présentent les courbes d'évolution du rendement des moteurs à 28 et 48 barres en fonction de la vitesse. On observe une augmentation du rendement pour chaque moteur avec l'accroissement de la vitesse. Pour le moteur à 28 barres, la valeur maximale est de 0.91 à une vitesse de rotation de 1484.80 tr/min, tandis que pour le moteur à 48 barres, elle est de 0.90 à une vitesse de rotation de 1476.12 tr/min.

III.3.4 Puissance utile 28 barres VS puissance utile 48 barres

La Figure III-29 représente la puissance utile en fonction de la vitesse.



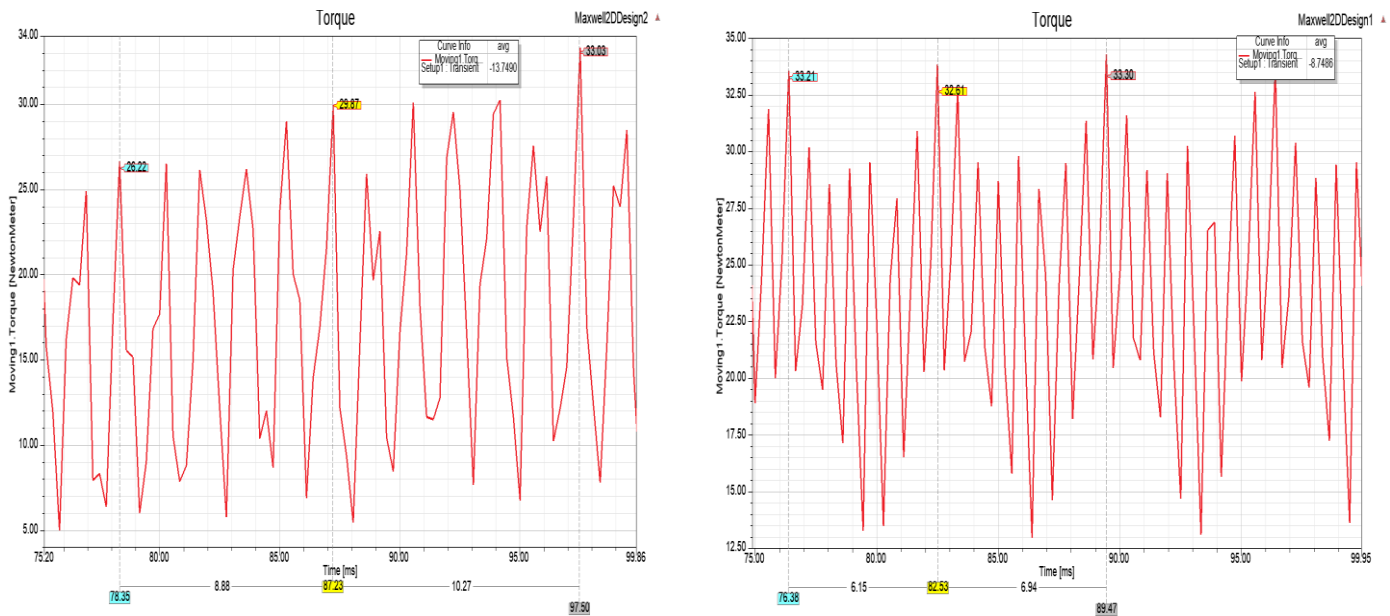
a) Puissance utile en fonction de la vitesse 28 barres b) Puissance utile en fonction de la vitesse 48 barres

Figure III. 29 Puissance utile en fonction de la vitesse

La figure III-29 présentent l'évolution de la puissance utile en fonction de la vitesse de rotation, pour un moteur à 28 barres et un moteur à 48 barres. On observe une augmentation de la puissance utile avec la vitesse. Pour le moteur à 28 barres, la puissance maximale est de 11.58 Kw à une vitesse de rotation de 1351.21 tr/min, tandis que pour le moteur à 48 barres, elle est de 13.5 Kw à une vitesse de rotation de 1252.02 tr/min. Ceci indique que le moteur à 48 barres est plus efficace que celui à 28 barres, ce qui représente une différence relative entre les deux moteurs.

III.3.5 Couples 28 barres VS couple 48 barres (Maxwell 2D)

La Figure III-30 représente les couples en fonction de temps



a) Couple en fonction de temps 28 barres

b) Couple en fonction de temps 48 barres

Figure III. 30 Couple en fonction de temps

La figure III-30 présentent la courbe de variation du couple en fonction du temps pour un moteur à 28 barres et un moteur à 48 barres. On observe que le moteur à 28 barres présente des ondulations nettement plus importantes et plus espacées, atteignant 33.03 Nm de la valeur du couple à 97.50 ms. En revanche, le moteur à 48 barres affiche des ondulations très faibles et uniformes, réduisant ainsi le bruit, avec une valeur de couple de 33.30 Nm à 89.47 ms. Par conséquent, le moteur à 48 barres constitue un choix judicieux pour les applications modernes.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons découvert le logiciel Maxwell 2D. Nous avons d'abord utilisé logiciel RMxpert pour définir nos dispositifs. Ensuite, les performances du moteur à induction ont été déterminées par simulation afin d'étudier une caractéristique spécifique des deux moteurs dans un système dynamique (transitoire). Nous avons créé un modèle bidimensionnel à l'aide de RMxpert pour un moteur à 28 barres et un moteur à 48 barres, puis nous avons simulé ces moteurs. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité de Maxwell 2D pour la détermination et l'analyse des performances des moteurs à induction par la méthode des éléments finis.

Chapitre IV

Machine Etudiée en Mode Défaillant

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous modéliserons et simulerons une machine asynchrone fonctionnant en mode de défaillance du rotor à l'aide de Maxwell-2D. Le modèle Maxwell-2D d'une machine fonctionnant en mode normal n'est plus valable dans ce cas, en raison de l'apparition de déséquilibres et d'asymétries suite à la rupture d'une barre du rotor. Il est donc nécessaire de modéliser la section transversale bidimensionnelle complète de la machine. À cette fin, nous identifierons les asymétries ou les barres rompues dans le plan du rotor et redéfinirons les conditions aux limites.

Plusieurs simulations ont été réalisées pour différents scénarios de rupture de barres ; les résultats obtenus seront présentés et discutés [18].

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

Pour modéliser des barres de rotor cassées dans Maxwell-2D, il est nécessaire de modéliser la section transversale bidimensionnelle complète de la machine en raison de l'asymétrie et des distorsions causées par la barre de rotor cassée. Les conditions aux limites et les opérateurs doivent également être redéfinis. Une barre de rotor cassée peut-être modélisée selon deux méthodes :

- La première consiste à augmenter la résistance de la barre de rotor cassée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit aussi proche de zéro que possible au repos.
- La seconde consiste à remplacer le matériau par du vide dans le circuit électrique connecté à la barre de rotor cassée.

Dans nos recherches, nous avons utilisé cette dernière méthode, qui modélise une barre de rotor cassée complète [18].

La figure IV-1 présente la géométrie sous Maxwell-2D du moteur Cas de deux barres cassées :

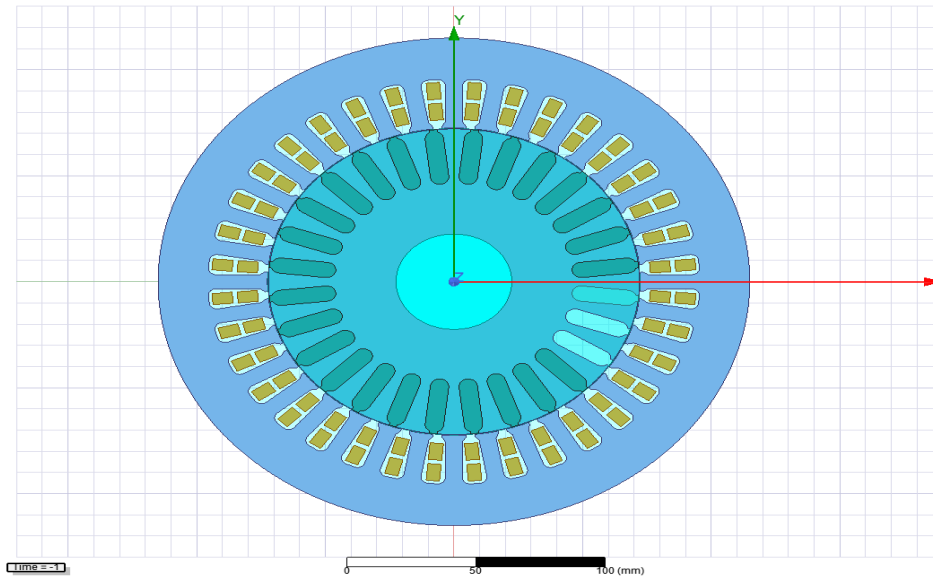


Figure IV. 1 Géométrie 2D du moteur étudié en cas de défaut de cassure de barres

Par ailleurs, Maxwell-2D permet le maillage de la géométrie du moteur étudié.

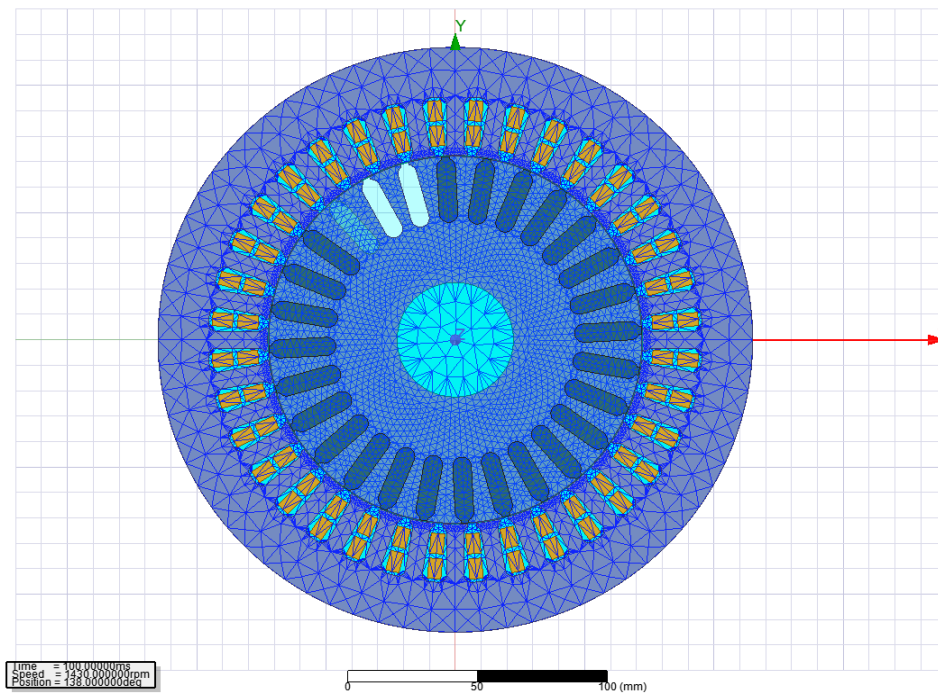


Figure IV. 2 Maillage de la section 2D du moteur étudié

Le nombre total d'éléments de maillage est de 12876 éléments.

La figure IV-3 ci-dessous représente les lignes de flux.

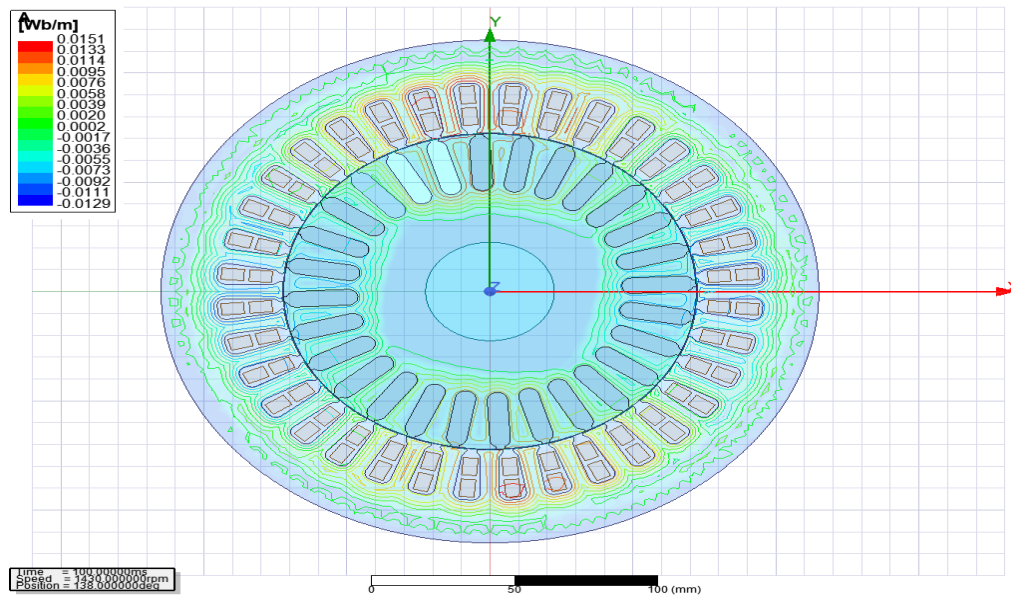


Figure IV. 3 Flux de la géométrie 2D

La figure IV-4 ci-dessous représente l'induction magnétique.

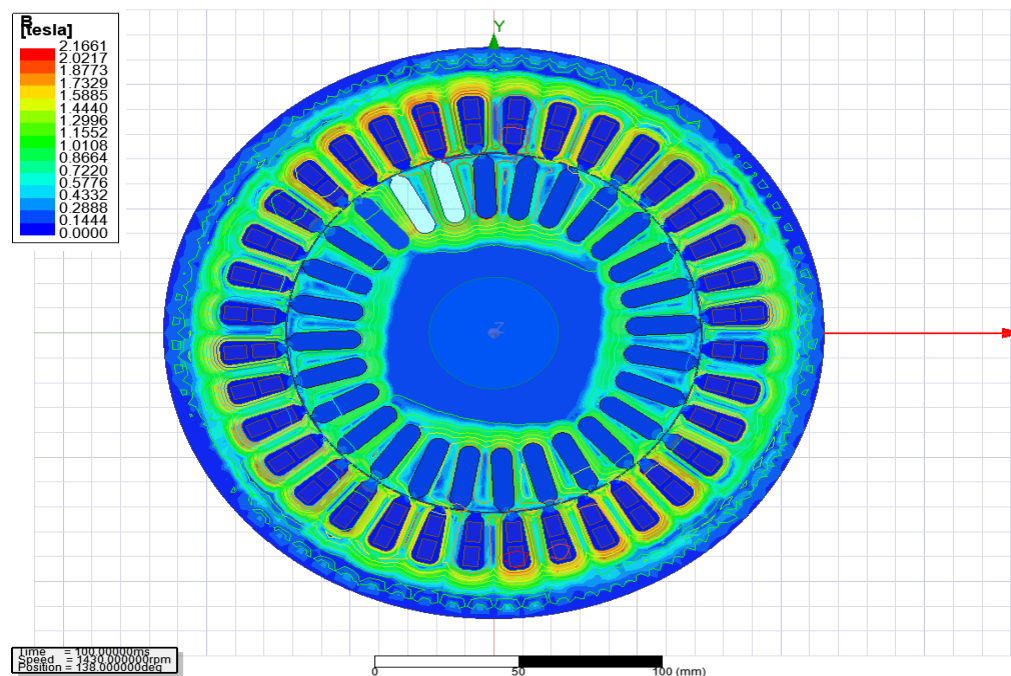


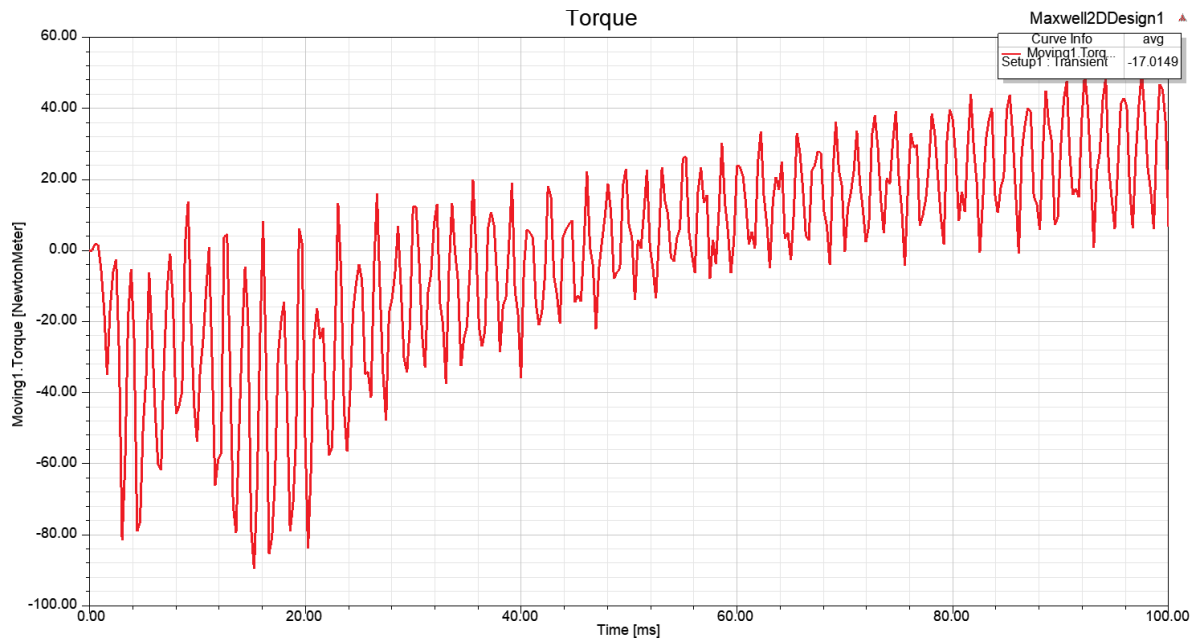
Figure IV. 4 Induction magnétique

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

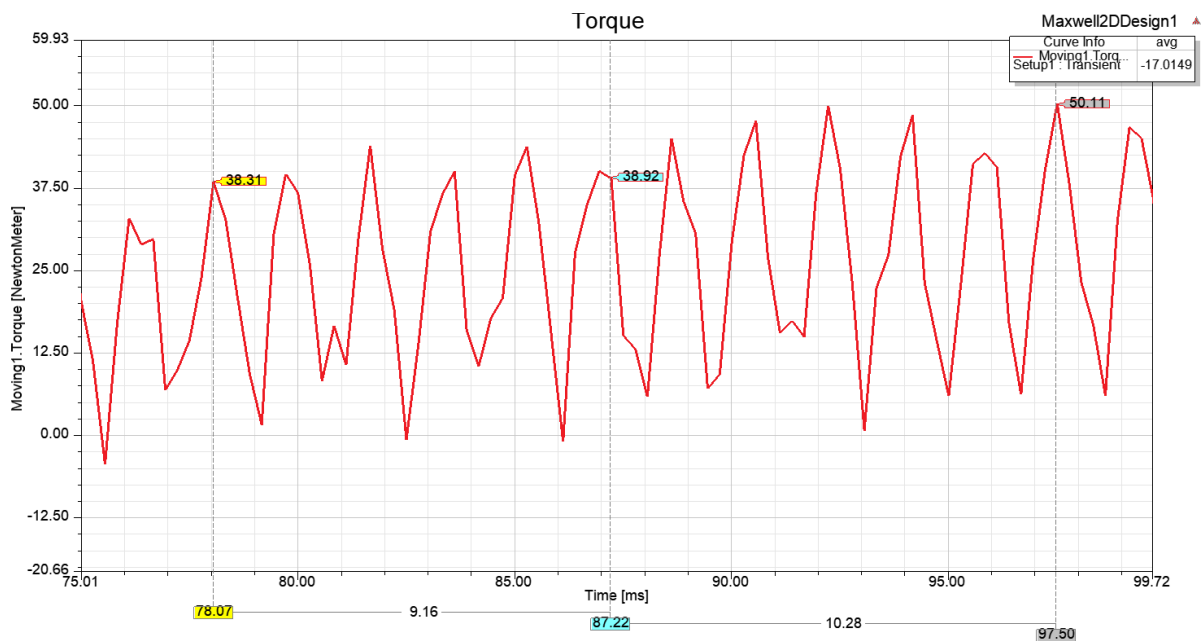
Pour illustrer l'effet de barres omnibus rompues sur les caractéristiques de la machine étudiée, nous avons simulé un démarrage à pleine charge avec deux barres omnibus rompues.

La figure IV- 5 présente les résultats de simulation obtenus pour deux barres omnibus adjacentes rompues. Elle illustre l'effet de ces ruptures sur les caractéristiques de la machine.

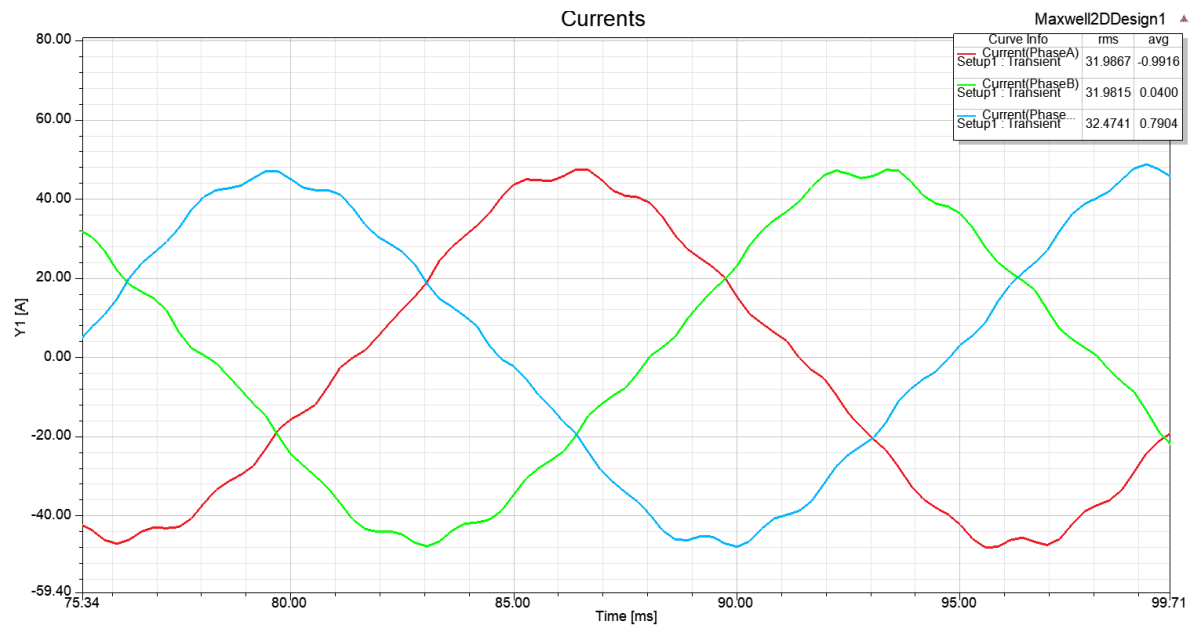
La figure IV- 5 présente les résultats de simulation obtenus pour deux barres omnibus adjacentes rompues : couple électromagnétique, courant de phase du stator, puissance mécanique et puissance électrique.



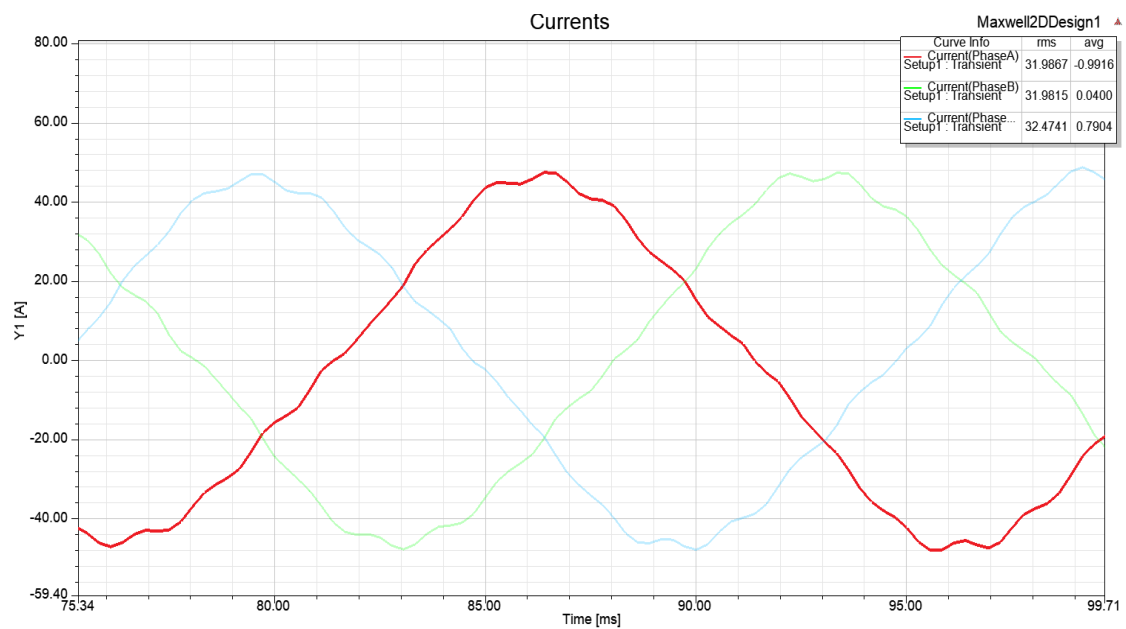
a) Couple électromagnétique



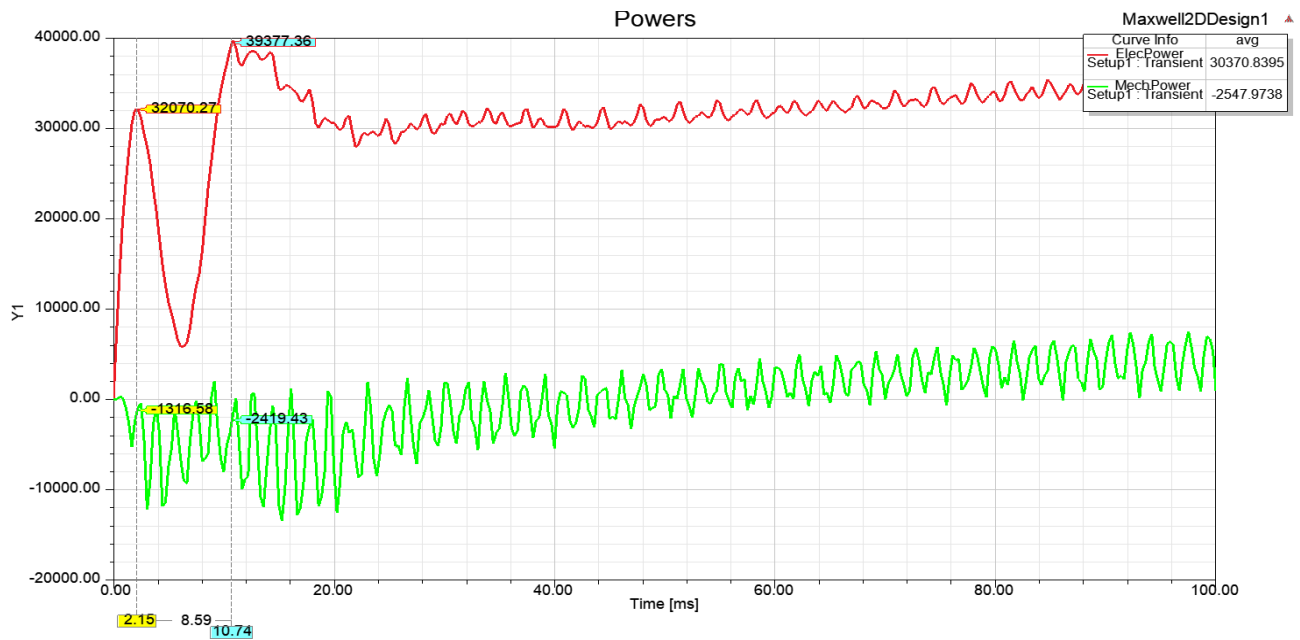
b) Zoom du couple



a) Zoom du courant triphasé



b) Courant d'une phase



c) Puissance électrique et puissance mécanique

Figure IV. 5 Résultats de simulation du moteur étudié au démarrage en cas de cassure de deux barres adjacentes

IV.4 Interprétation des résultats de simulation du modèle 2D

IV.4.1 Couple utile en fonction du temps

La figure IV.5 (Couple électromagnétique) présente la courbe couple-temps d'un moteur de 28 bars. Ce moteur présente des ondulations beaucoup plus importantes et espacées, le couple atteignant 55.11 Nm à 97,50 ms.

IV.4.2 Courant en fonction du temps

Évolution du courant en fonction du temps sous charge. La figure IV-5 illustre l'évolution du courant en fonction du temps, montrant des courants élevés dans les trois phases au démarrage. Ceci est dû au couple de démarrage de la machine, qui génère des courants supplémentaires (courants de démarrage) ; il s'agit de la phase de transition. Après ce point, les courants diminuent jusqu'à se stabiliser à leurs valeurs efficaces.

IV.4.3 Puissance électrique et puissance mécanique en fonction du temps

Le document représente l'évolution temporelle de la puissance électrique et de la puissance mécanique sur une période de 100 millisecondes. On en observe les valeurs moyennes 30370.84 w pour la puissance électrique et -2547.97 w pour la puissance mécanique sur la durée de la simulation.

On observe une transition nette au début de la simulation. La puissance électrique, initialement nulle, augmente rapidement jusqu'à un pic initial d'environ 32070.27 w en 2.15

ms, avant de chuter à environ 6 000 w en 6 ms. Elle remonte ensuite jusqu'à un pic encore plus élevé d'environ 39 377.36 w en 10.74 ms. Cette oscillation amortie typique correspond à la stabilisation progressive du système électromagnétique de la machine : les courants et les flux n'ont pas encore atteint un régime permanent, et il existe une oscillation entre l'énergie stockée dans les inductances et l'énergie fournie au circuit.

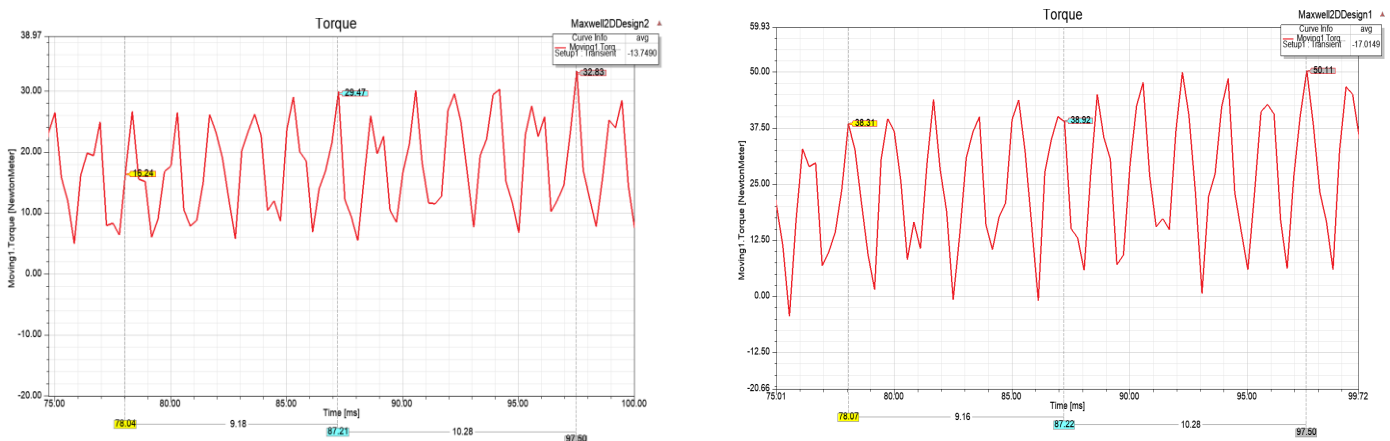
On observe également une puissance mécanique, mais d'amplitude bien plus faible et avec des oscillations à haute fréquence. La puissance chute aux alentours de -6050 w pendant 15 à 15.2 ms avant de remonter, ce qui indique que la machine absorbe initialement de l'énergie mécanique et suggère une vitesse de démarrage relativement lente pour la stabilisation.

Après environ 20 millisecondes, les fortes oscillations s'atténuent et les deux courbes se stabilisent autour d'une direction plus régulière, avec une légère ondulation périodique à haute fréquence. La puissance électrique se stabilise autour de 28 000–33 000 w, avec une légère tendance à la hausse vers la fin de la simulation, ce qui peut indiquer que le régime permanent n'était pas totalement atteint à 100 ms, ou que la vitesse du rotor s'adaptait lentement au début. La puissance mécanique oscille en moyenne autour de (-8 000) – 8 000 w pendant toute la durée de la simulation.

IV.5 Comparaison entre Moteur asynchrone triphasé Sans défaut avec 28 barres rotoriques et avec défaut (Cassures de deux barres)

IV.5.1 Couples 28 barres VS couple deux barres cassées

La Figure IV-6 représente les couples en fonction de temps



a) Couple en fonction de temps 28 barres

b) Couple en fonction de temps (Cassures de 2 barres)

Figure IV. 6 Couple en fonction de temps

La figure III-30 montre la courbe de couple dans le temps pour deux moteurs : l'un avec une puissance de 28 bars et l'autre avec une puissance de 28 bars, mais avec deux lignes discontinues, où la valeur moyenne du couple pour un moteur à 28 bars est de 1 375 et l'autre de 1 701. Le moteur à 28 bars présente des ondulations sensiblement plus grandes et plus espacées, avec un couple atteignant 33,03 Nm à 97,50 ms. En revanche, le moteur 28 bars révisé est nettement plus grand et plus espacé, avec un couple atteignant 50,11 Nm à 97,50 ms, un moteur 28 bars constitue donc un choix approprié.

IV.5.2 Courant 28 barres VS courant deux barres cassées

La Figure IV- 7 représente les courants en fonction de temps

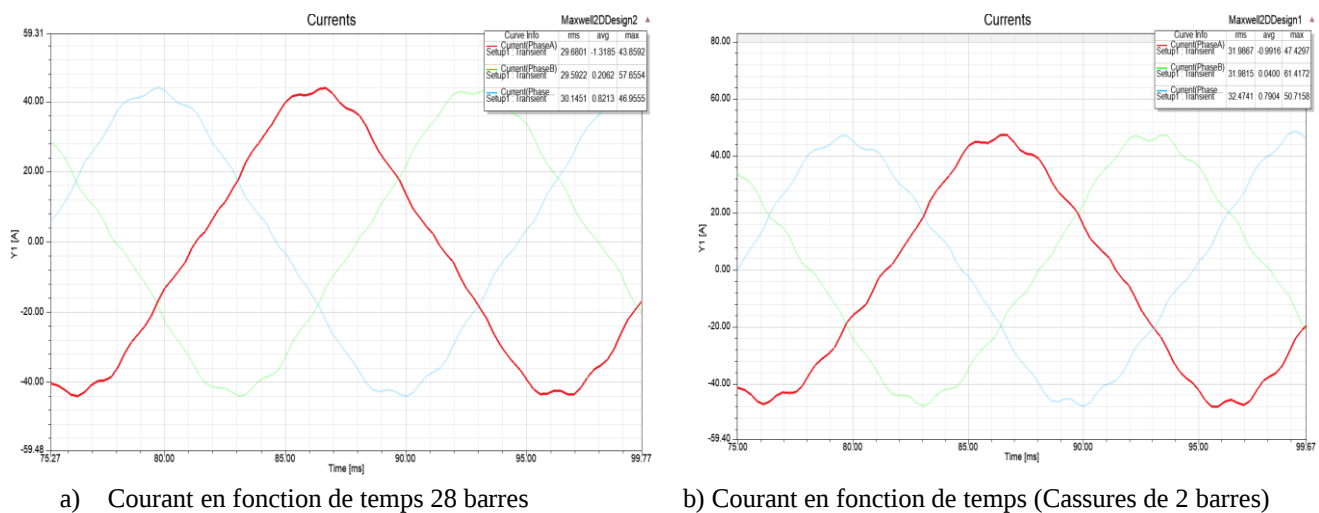
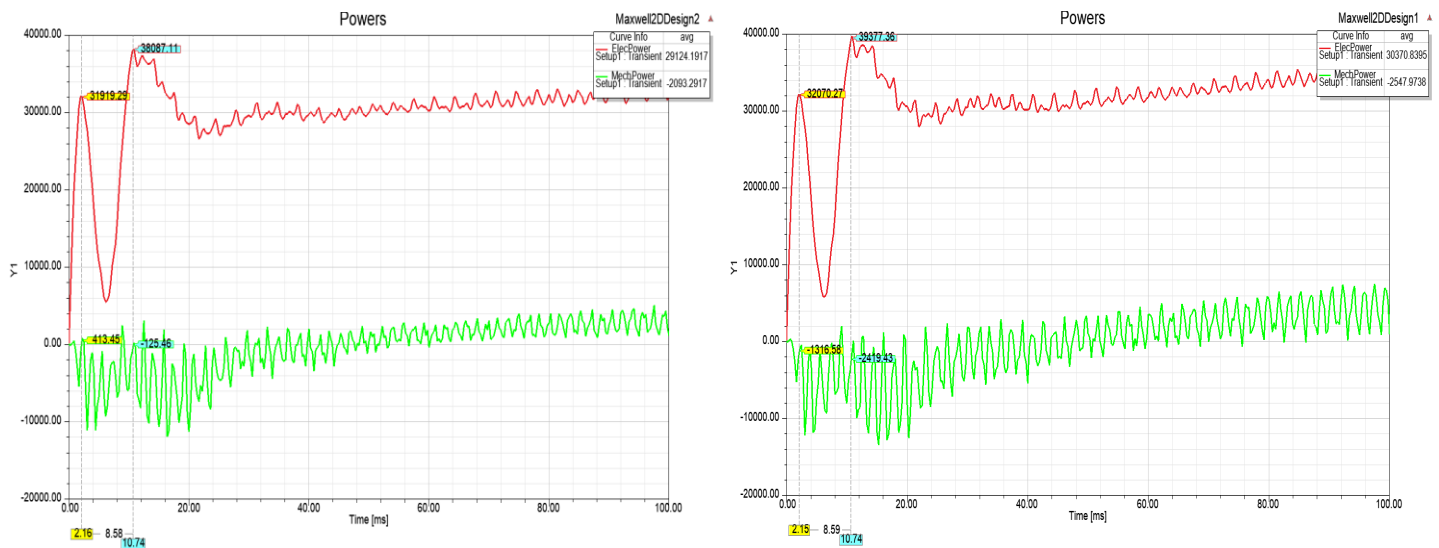


Figure IV. 7 Courant en fonction de temps

Le document présente les variations temporelles du courant pour un moteur en fonctionnement et un moteur défectueux. Pour les deux moteurs, la forme d'onde est sinusoïdale sur la période étudiée, atteignant environ 50 Hz. L'intervalle entre deux pics successifs est d'environ 86.5 ms et 96.5 ms, soit un demi-cycle de 10 ms. Le courant de crête atteint 4 3.86 A, avec une valeur efficace (RMS) de 29.68 A pour le moteur en fonctionnement, tandis que pour le moteur défectueux, il atteint 4 7.43 A, avec une valeur efficace de 31.97 A. Par conséquent, la variation observée indique que le signal n'est pas une sinusoïde, mais plutôt une onde présentant des oscillations à haute fréquence dans les deux cas.

IV.5.3 Puissance E et puissance M 28 barres VS Puissance E et puissance M 28 barres

Figure IV-8 représente puissance électrique et puissance mécanique en fonction temps



a) Puissance électrique et puissance mécanique

b) Puissance électrique et puissance mécanique
(Cassures de 2 barres)

Figure IV. 8 Puissance électrique et puissance mécanique en fonction de temps

Le document présente deux courbes : la puissance électrique et la puissance mécanique des moteurs en fonctionnement et en panne, en fonction du temps. On observe que la puissance électrique présente une valeur moyenne similaire : 29124.19 w pour le moteur en fonctionnement et 30370.84 w pour le moteur en panne. En revanche, la puissance mécanique présente une différence significative à l'instant 216, elle est de 413.45 w pour le moteur en fonctionnement et de 1316.58 w pour le moteur en panne, confirmant ainsi la différence de puissance mécanique.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une simulation d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, fonctionnant dans des conditions spécifiques, à l'aide d'un logiciel de simulation Maxwell-2D. Nous avons constaté que la rupture de deux barres adjacentes provoque des oscillations du couple et du courant. L'espacement de ces oscillations augmente avec le nombre de barres rompues. De toute évidence, l'amplitude du couple et du courant

statorique est plus importante lorsque plus de deux barres adjacentes sont rompues. Enfin, nous avons comparé le moteur en fonctionnement avec le moteur défectueux

Conclusion générale

Les travaux menés au cours de ce mémoire s'inscrivent dans le cadre d'une contribution à l'étude du comportement d'un modèle de moteur asynchrone à cage d'écureuil. Ceci à l'aide du logiciel de simulation ANSYS Maxwell qui est basé sur la méthode des éléments finis. La conception du model est réalisé grâce au module RMxprrt intégré au logiciel. En effet ce module effectue les calculs de performances de la machine et permet la création de la géométrie du moteur et ainsi l'étude de ses caractéristiques par la MEF [16].

L'application RMxprrt du logiciel a été utilisée pour avoir la géométrie et les paramètres de notre machine. Les caractéristiques et les paramètres de fonctionnement obtenus par RMxprrt sont proches de ceux obtenus à partir de la plaque signalétique et les mesures expérimentales déjà effectuées sur la machine étudiée, pour cela on les a pris comme références [13].

Le travail effectué nous a permis de mettre en œuvre les connaissances vulgarisées dans les chapitres précédents. Tel que la constitution, principe et caractéristiques de fonctionnement des machines asynchrones ainsi que leur comportement dans l'accomplissement des fonctions requises. Nous avons présenté les équations de Maxwell. Parmi les méthodes de résolutions de ces équations nous nous sommes intéressés à la méthode des éléments finis qui est mise en pratique par le logiciel employé [16].

Et dans chapitre III le travail effectué nous a permis d'étudier comparaison entre un moteur 48 barres et moteur 28 barres.

Dans le chapitre précédent, nous avons démonté l'arbre moteur et l'avons comparé à un moteur en état de marche.

En fin de compte, nous souhaitons que ce mémoire puisse devenir une ressource de travail pour les étudiants à venir, et qu'il soit continuellement amélioré et enrichi afin d'optimiser son utilité.

Bibliographies

- [1] A. BELKACEM, A. ALI SALIMA, « Etude par éléments finis d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [2] H. ABDENNOUR, « Diagnostic des défauts statoriques des machines Asynchrones par l'approche LS-SVM », Mémoire de Master, Université Amar Telidji de Laghouat, 2023.
- [3] TIDJANI, « Identification paramétrique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil par la technique optimisation d'essaim de particules », Mémoire de Master Académique en Electrotechnique, Université Kasdi Merbah de OUARGULA, 2016.
- [4] B. Nadia, C. Farida, « Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil pourvue de cales ferromagnétiques », Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [5] R. HASSAD, « Estimation et identification des paramètres électriques d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil », Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2022.
- [6] B. Soumaya, « Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2016.
- [7] M. Mohamed, M. Rafik, « Identification d'une machine asynchrone à cage », Mémoire de Master Académique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [8] H. HALLEG, N. CHAUCHE, « identification des paramètres d'une machine asynchrone, influence de son alimentation via un onduleur de tension et application d'une commande vectorielle indirecte », Mémoire de Master en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2005.
- [11] M. Abderrahim, H. Ismail, « Simulation Numérique D'un Moteur Asynchrone », Mémoire de Master Académique, Université Kasdi Merbah de OUARGULA, 2022.

- [12] H. Achouak, G. Louiza, « Contribution to SRM design for industrial application », Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem ,2024.
- [13] H. Hakim, M. Ali, « Étude et conception d'un moteur asynchrone monophasé à condensateur permanent », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,2023.
- [14] S. Walid, G. Kaled, « Modélisation par éléments finis d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil », Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès,2019.
- [15] M. Abderrahim, H. Ismail, « Simulation numérique d'un moteur asynchrone », Mémoire de Master académique, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2022.
- [16] A. Mohamed, C. Nadir, « Étude par éléments finis et diagnostic d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil : Application sur le modèle 223-2p 45 KW ELECTRO-INDUSTRIE », Mémoire de Master académique, Université Mouloud Mammeri - Tizi Ouzou,2021.
- [17] B. Samy, O. Arezki, « Conception d'un moteur asynchrone monophasé », Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie,2022.
- [18] I. Ghoulane, A. Djabri, « Diagnostic des défauts de cage rotorique d'un MAS en utilisant RMxpert & ANSYS-Maxwell », Mémoire de Master, Université Amar Telidji de Laghouat , 2022.
- [9] Atlanta Drive France, (s.d.), « le moteur asynchrone, fonctionnement, typologie et utilisations », Atlanta Drive France, <https://atlanta-drive.fr/7-20/actualites/sesame-comment-fonctionne-un-moteur-asynchrone-typologie-et-utilisation/>
- [10] LAEG Electric, « les applications d'un moteur asynchrone », <https://www.laeg-en.com/fr/What-are-the-applications-of-an-asynchronous-motor-id48722476.html> Éditeur du site, 20.