

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

Hammad Thinhinane

Achouri Houda

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

**Diagnostic de défauts rotoriques de la Machine Asynchrone
Par l'Analyse Spectrale**

Soutenu le 09 Septembre 2020 devant les jurys :

Boudouda	Aimad	MCA	UMB Boumerdes	Président
Larabi	Zina	MAA	UMB Boumerdes	Examineur
Bouzida	Ahcene	MCA	Université de Bouira	Rapporteur

Année Universitaire : 2019/2020

ملخص

تستخدم الآلات غير المتزامنة على نطاق واسع لأن تكلفتها أقل من الآلات الأخرى (هذه الأنواع من الآلات قوية). ومع ذلك، مثل الآلات الأخرى في خطوط الإنتاج حيث تلعب دورًا استراتيجيًا، فإن الحفاظ على استمرارية تشغيلها في حالة جيدة يتطلب اهتمامًا خاصًا في سياق المراقبة، لأن العطل يمكن أن يحدث في أي وقت ويسبب خسائر كبيرة.

الهدف من هذه الدراسة هو تشخيص أعطال الدوار، للكشف عن هذه الأعطال، استخدمنا طريقة تعتمد على التحليل الطيفي لإشارة تيار الجزء الثابت لتحديد المعلمات الخاصة بالأعطال التي تمت دراستها وفقًا للترتيب التوافقي $k = 1, 2, \dots$ في المعادلة الرياضية $f(kg 2 + 1)$ أو آخر $f(kg 2 - 1)$ مع جميع حالات تشغيل الجهاز مثل: حالة صحية، شريط واحد مكسور، شريطين مكسوران وثلاثة أشرطة مكسورة.

كلمات الدلالية: آلة غير متزامنة، تشخيص وكشف أعطال الدوار، كسر أشرطة الدوار، التحليل الطيفي.

Abstract

Asynchronous machines are widely used because their cost is lower than that of other machines (these types of machines are robust). However, like other machines in the production lines where it plays a strategic role, maintaining continuity of its operation in good condition requires special attention in the context of monitoring, because a failure can occur at any time and cause great losses.

The objective of this study is the diagnosis of rotor faults, for the detection of these faults, we used a method based on the spectral analysis of the stator current signal to determine the parameters specific to the faults studied according to the harmonic rank $k=1, 2, \dots$ in the mathematical equation $(1+2kg) f$ or else $(1-2kg) f$ with all the operating states of the machine such as: healthy state, one broken bar, two broken bars and three broken bars.

Keywords: Asynchronous machine, Diagnosis and detection of rotor faults, Failure of rotor bars, Spectral analysis.

Résumé

Les machines asynchrones sont largement utilisées car leur coût est inférieur à celui des autres machines, (Ce type de machine sont robustes). Cependant, comme d'autres machines dans les chaînes de production où elle joue un rôle stratégique, le maintien de la continuité de son fonctionnement non dégradé nécessite une attention particulière dans le cadre de surveillance, car une panne peut à tout moment survenir et entraîner de grandes pertes.

L'objectif de cette étude est le diagnostic des défauts rotoriques, pour la détection de ces défauts, nous avons utilisé une méthode basée sur l'analyse spectrale du signal du courant statorique pour déterminer les paramètres spécifiques aux défauts étudiés selon le rang d'harmonique $k=1, 2, \dots$ dans l'équation mathématique $(1+2kg) f$ ou bien $(1-2kg) f$ avec l'ensemble des états de fonctionnement de la machine tel que : état sain, une barre cassée, deux barres cassées et trois barres cassées.

Mots clés : Machine Asynchrone, Diagnostic et détection des défauts rotoriques, Cassure des barres rotoriques, Analyse spectrale.

Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut pour exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance...

Que Je dédie ce travail ...

A mes chers Parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez converti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tous le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices.

Puisse Dieu, le très Haut, vous accord votre santé, bonheur et longue vie.

A mes chères sœurs, mes conseiller, et mes meilleures amies, celles qui m'ont pris doucement par la main pour traverser ensemble les épreuves pénibles,

Moh, Mon petit frère que j'adore énormément.

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tous puissant, vous protège et vous garde.

A mes chers petits neveux et nièces, Lyna, Mimi, Samy et Adam, Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous, votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur. Puisse Dieu vous garde.

A mes meilleurs Amis, en souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

Un spécial dédicace à cette personne qui compte énormément pour moi, et pour qui je porte beaucoup de tendresse et de respect.

A toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail, a tous ceux que j'ai omis de citer.

Thinhinane

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de respect, de reconnaissance et de gratitude, A DIEU de tout puissant de m'avoir donné le courage, la santé, et m'accordé son soutien durant les périodes les plus difficiles.

A la lumière de mes yeux, l'ombre de mes pas et le bonheur de ma vie mes chers parents : qui m'ont apporté leur appui durant toute mes années d'étude, pour leur sacrifice et soutien qui m'ont donné confiance, courage et sécurité. Là où je suis arrivée aujourd'hui grâce à vous mes chers parents. Que Dieu vous garde en bonne santé.

A mes chers frères, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous,

A mon mari avec tout mon amour, je te remercie pour ton soutien inconditionnel durant toutes cette année.

A ma belle-famille, je vous remercie tout particulièrement pour votre soutien et affection. Puissiez-vous trouver dans ce travail le témoin de mon affection et estime.

Houda

Remerciement

Nous tenons à remercier tout d'abord notre DIEU de nous avoir donné la volonté, la santé, le courage et la patience pour réaliser ce travail.

***A notre Maitre, Président et rapporteur de mémoire, Monsieur Ahcene BOUZIDA
Docteur de l'enseignement supérieure***

Nous sommes très honorés de vous avoir comme promoteur de notre projet fin d'étude. Nous vous remercions pour la gentillesse et la spontanéité avec lesquelles vous avez bien voulu diriger ce travail, nous avons eu le grand plaisir de travailler sous votre direction, et avons trouvé auprès de vous le conseiller et le guide qui nous a reçu en toute circonstance avec sympathie, sourire et bienveillance.

Votre compétence professionnelle incontestable ainsi que vos qualités humaines vous valent l'admiration et le respect de tous, Vous êtes et vous serez pour nous l'exemple de rigueur et de droiture dans l'exercice de la profession.

Veillez, cher Maitre, trouvez dans ce modeste travail l'expression de notre haute considération, de notre sincère reconnaissance et de notre profond respect.

***A notre encadreur de stage, Ingénieure au niveau de l'usine Electro-Industries,
N.HACHICHE.***

Nous avons eu le grand plaisir de travailler avec vous, nous vous remercions pour votre accueil, vos conseils et pour le temps que vous nous avez consacré tout au long de cette durée.

Nous tenons aussi à remercier et à témoigner toutes nos reconnaissances aux personnels de l'entreprise, pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'elles nous ont fait vivre durant ce stage au sein de l'entreprise.

*Sans oublier, tous les Enseignants de l'université de M'Hamed Bouguera, particulièrement **Mr M. HAMEL** pour son aide et encouragement.*

Nos remerciements et gratitude s'adressent aussi aux monsieur le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de notre travail.

Thinhinane et Houda

Table des matières

Table des matières	
Liste des figures	
Listes des tableaux	
Principales notations utilisées	
Introduction Générale	1
Chapitre I	
Présentation de l'entreprise Electro-Industrie	
I.1 Introduction	3
I.2 Historique et présentation de l'entreprise	3
I.2.1 Historique	3
I.2.2 Présentation Electro-Industries	4
I.3 Description du processus de fabrication, organisation des ateliers et leurs fonctions principales	4
I.3.1 Atelier de découpage	5
I.3.2 Atelier d'usinage	7
I.3.2.1 Préparation des arbres	7
I.3.2.2 Usinage des différentes pièces	7
I.3.3 Atelier de bobinage	7
I.3.3.1 les éléments d'isolation du bobinage	8
I.3.3.2 Préparation des bobines	8
I.3.3.3 les différentes étapes nécessaires pour le bobinage du stator	9
I.3.3.4 connexions	10
I.3.4 Atelier de montage	10
I.3.4.1 Secteur équilibrage du rotor	10
I.3.4.2 Pres Montage	11
I.3.4.3 Secteur Montage	11
I.3.4.4 Les essais des moteurs asynchrones triphasés	12
I.4 Conclusion	12
Chapitre II	
Etat de l'art des défauts des MAS et leurs techniques de diagnostic	
II.1 Introduction	13
II.2 Constitution de la machine asynchrone	13
II.2.1 Stator	14
II.2.2 Rotor	15
II.2.3 Paliers	15
II.3 Etude statistique sur les défauts des machines asynchrones	16
II.4 Types de défauts	18
II.4.1 Défauts d'ordre électrique	18
II.4.1.1 Défauts au stator	18
II.4.1.2 Défauts au rotor	19
II.4.2 Défauts d'ordre mécanique	20
II.4.2.1 Défauts de roulements	20
II.4.2.2 Excentricité	21
II.4.2.3 Défaillances du flasque	22
II.4.2.4 Défaillances de l'arbre	22
II.5 Intérêt de diagnostic	22
II.6 Méthodes de diagnostic basée sur le traitement de signal	23
II.6.1 Transformée de Fourier	23
II.6.1.1 Transformée de Fourier discrète	23

II.6.1.2 Transformée de Fourier rapide.....	24
II.6.2 Periodogramme.....	24
II.6.2.1 Periodogramme simple.....	24
II.6.2.2 Periodogramme modifié	25
II.6.3 Estimateurs spectraux à variance réduite.....	25
II.6.3.1 La méthode de Bartlett.....	25
II.6.3.2 La méthode de Welch.....	26
II.7 Diagnostic des défauts par le suivi des grandeurs mesurables.....	26
II.7.1 Analyse fréquentielle des courants statoriques et du flux de dispersion	27
II.8 Conclusion	28

Chapitre III

Conception assistée par ordinateur de la machine asynchrone 4KW

III.1 Introduction.....	29
III.2 Présentations du logiciel ANSYS Maxwell 2D/3D.....	29
III.3 Présentation du module RMxpert.....	30
III.4 Etape de la conception sur le module RMxpert.....	30
III.4.1 Paramètres de la machine.....	31
III.4.2 Etape de la conception.....	32
III.5 Dimensions principales du stator.....	33
III.5.1 Dimensions Principales de l'encoche statorique.....	34
III.6 Dimensions principales du rotor	34
III.6.1 Dimensions de l'encoche rotorique.....	35
III.7 Configuration du bobinage.....	36
III.8 Choix des matériaux.....	37
III.9 Validation et exportation de model vers Maxwell 2D.....	38
III.9.1 Validation du model 2D et exploitation des résultats.....	38
III.9.2 Distribution de l'induction magnétique.....	39
III.9.3 Exploitation des résultats de simulation.....	40
III.10 Conclusion	41

Chapitre IV

Détection des défauts rotoriques par l'analyse spectrales

IV.1 Introduction.....	42
IV.2 Simulation de la Machine Asynchrone en présence de défauts rotoriques.....	42
IV.2.1 Modélisation du défaut de rupture des barres.....	42
IV.2.2 Analyse des résultat magnétiques.....	43
IV.2.3 Courant dans les phases statoriques	48
IV.2.4 le Couple Electromagnétique.....	50
IV.3 Application de l'analyse spectrale au diagnostic de défauts des machines asynchrones	52
IV.3.1 Application de l'analyse spectrale aux résultats de simulation.....	52
IV.3.1.1 Spectre des courants statoriques.....	52
IV.3.1.2 Spectre de Couple Electromagnétique	56
IV.4 Conclusion	59
Conclusion Générale et Perspectives	60
Bibliographies	61
Annexes	63

Liste des figures

Chapitre I	
Figure I.1 : Découpage des feuilles de tôles statoriques et rotoriques	5
Figure I.2 : Paquet statorique	6
Figure I.3 : Paquet rotorique	6
Figure I.4 : Flasques en alliage d'aluminium moulé sous pression	6
Figure I.5 : Arbre d'un moteur électrique après usinage	7
Figure I.6 : Stator avec caniveaux d'encoches isolés	8
Figure I.7 : Bobinage statorique	9
Figure I.8 : Les types de connexions de la machine	10
Chapitre II	
Figure II.1 : Machine asynchrone triphasé	14
Figure II.2 : Stator d'une machine asynchrone triphasé	14
Figure II.3 : Les différents types de rotor	15
Figure II.4 : Répartition des défauts dans les machines de moyennes puissance en 1988	17
Figure II.5 : Distribution des défauts dans les machines asynchrones de grande puissance	18
Figure II.6 : Représentation de court-circuit inter-spores.....	19
Figure II.7 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil	20
Figure II.8 : Roulement à bille	21
Figure II.9 : Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte	21
Figure II.10 : Spectre du courant statorique (Résultats expérimentaux)	27
Chapitre III	
Figure III.1 : Etapes d'utilisation de Maxwell pour la MAS	30
Figure III.2 : Interface de sélection du type de la machine	32
Figure III.3 : Fenêtre du gestionnaire de projet	33
Figure III.4 : Dimensions principales du stator	34
Figure III.5 : Dimension des encoches statorique	34
Figure III.6 : Dimensions principales du rotor	35
Figure III.7 : Forme d'encoche utilisée pour créer l'encoche rotorique	35
Figure III.8 : Paramètres de l'enroulement et du bobinage	36
Figure III.9 : Distribution du bobinage statorique	36
Figure III.10 : Type du matériau	37
Figure III.11 : Caractéristiques B(H) du matériau utilisé dans le circuit magnétique	37
Figure III.12 : Le modèle 2D de la machine asynchrone	38
Figure III.13 : Distribution de l'induction magnétique	39
Figure III.14 : Distribution des lignes du champ	39
Figure III.15 : Courant statorique	40
Figure III.16 : Couple électromagnétique	40
Chapitre IV	
Figure IV.1 : Géométrie de la machine	43
Figure IV.2 : Distribution de l'induction magnétique pour une Machine saine	44
Figure IV.3 : Distribution de l'induction magnétique pour une Machine avec une barre cassée ...	44
Figure IV.4 : Distribution de l'induction magnétique pour une machine avec deux barres cassées	45
Figure IV.5 : Distribution de l'induction magnétique pour une Machine avec trois barres cassées	45
Figure IV.6 : Distribution des lignes du champs pour une machine saine	46

Figure IV.7 : Distribution des lignes du champs pour une machine avec une barre cassée	46
Figure IV.8 : Distribution des lignes du champs pour une machine avec deux barres cassées	47
Figure IV.9 : Distribution des lignes du champs pour une machine avec trois barres cassées	47
Figure IV.10 : Courant statorique pour une machine saine	48
Figure IV.11 : Courant statorique pour une machine avec une barre cassée	48
Figure IV.12 : Courant statorique pour une machine avec deux barres cassées	49
Figure IV.13 : Courant statorique pour une machine avec trois barres cassées	49
Figure IV.14 : Couple électromagnétique d'une machine saine	50
Figure IV.15 : Couple électromagnétique d'une machine avec une barre cassée	50
Figure IV.16 : Couple électromagnétique d'une machine avec deux barres cassées	51
Figure IV.17 : Couple électromagnétique d'une machine avec trois barres cassées	51
Figure IV.18 : Exemple de spectre des courants déséquilibrés	52
Figure IV.19 : Spectre du courant statorique d'une machine saine	53
Figure IV.20 : Spectre du courant statorique d'une machine avec une barre cassée	53
Figure IV.21 : Spectre du courant statorique d'une machine avec deux barres cassées	54
Figure IV.22 : Spectre du courant statorique d'une machine avec trois barres cassées	54
Figure IV.23 : l'évolution des harmoniques (1-2kg) f dans les différentes machines	55
Figure IV.24 : l'évolution des harmoniques (1+2kg) f dans les différentes machines	56
Figure IV.25 : Spectre du couple électromagnétique d'une machine saine	56
Figure IV.26 : Spectre du couple électromagnétique d'une machine avec une barre cassée	57
Figure IV.27 : Spectre du couple électromagnétique d'une machine avec deux barres cassées	57
Figure IV.28 : Spectre du couple électromagnétique d'une machine avec trois barres cassées	58

Listes des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : Défauts des machines électriques selon leurs origines.....	16
--	----

Chapitre III

Tableau III.1 : Paramètres nominaux de la machine 4kW.....	31
Tableau III.2 : Dimensions du Stator.....	31
Tableau III.3 : Dimensions du Rotor.....	32
Tableau III.4 : Dimensions des barres rotoriques.....	32

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Variation d'amplitude en dB des harmoniques de défauts.....	55
---	----

Notation, symboles, abréviations et acronymes

Abréviations et Acronymes

EI	Electro-Industries
ENEL	Entreprise Nationale des Industries Electrotechniques
UMAGE	Unité Moteurs Asynchrones et Générateurs électriques
U_n	Tension Nominale
I_n	Courant Nominal
U_{cc}	Tension de Court-Circuit
I_0	Courant à vide
P_0	Puissance à vide
DSP	Densité Spectrale de Puissance
TFD	Transformée de Fourier Discrète
ITFD	Transformée de Fourier Discrète Indirecte
TFR	La transformée de Fourier Rapide
CAO	Conceptions Assistées par Ordinateur
AC	Courant Alternatif
DC	Courant Continu

Notation et Symboles

N	Le nombre de points de calcul de la TFD
F	Transformée de Fourier
F_c	Transformée de Fourier en cosinus
F	Fréquence
T	La période d'échantillonnage
B	La densité de flux magnétique
H	L'intensité du champ magnétique

Introduction générale

La machine asynchrone, sa construction et sa robustesse, assure une large plage d'application dans le domaine de l'industrie. Son exploitation pour fournir de l'énergie mécanique est excellente.

Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts. Par comparaison avec les moteurs à bagues, les moteurs à cage ont l'avantage d'être robuste et de coût beaucoup plus faible.

Le diagnostic des machines électriques s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables car une quelconque défaillance, même la plus anodine, peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système.

Le travail proposé s'attarde sur le diagnostic des machines asynchrones triphasées à cage. L'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise (cas des machines de fortes puissances) sans oublier la perte de production occasionnée.

Notre travail est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre nous allons présenter les différentes parties de l'entreprise Electro-Industries, spécialisée dans la fabrication de la commercialisation des transformateurs de distribution et moteurs électriques monophasés et triphasés.

Dans le deuxième chapitre, on présente la partie constructive de la machine asynchrone ainsi que les méthodes de diagnostic basée sur l'analyse spectrale en consacrant une partie pour classifier les défauts qui peuvent l'affecter au cours de son fonctionnement où les effets et les causes de ces

défaillances seront discutés.

Le troisième chapitre présentera une étude de la machine asynchrone à cage dans son état normale (sans défauts) en utilisant le logiciel Maxwell 2D. Cette étude consiste à simuler et analyser les performances et les caractéristiques dynamique du moteur étudié.

Dans le quatrième chapitre on présentera les résultats de simulation du moteur en présence des barres cassées. Les résultats de simulation seront présentés dans ce chapitre avec les caractéristiques dynamiques courants et couples. Nous allons également présenter une méthode de détection basée sur l'analyse spectrale du courant statorique et du couple électromagnétique afin de suivre les harmoniques inducteurs. En fin de ce travail on terminera avec une conclusion générale.

Chapitre I

Présentation de l'entreprise Electro-industries

I.1 Introduction

Un moteur électrique sert à transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique. La plupart des moteurs tournent autour d'un axe, mais ils existent des moteurs spéciaux qui se déplacent de façon linéaire. Tous les moteurs fonctionnent soit en courant alternatif soit en courant continu, mais quelques moteurs peuvent fonctionner en deux modes.

Les moteurs électriques, fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIES AZAZGA sont du type asynchrone triphasé à une ou à deux vitesses, et monophasé à deux condensateurs démarrage et permanent, de construction fermée, à carcasse ventilée, en alliage d'aluminium et en fonte. Les rotors sont en court-circuit à simple et double cages d'écureuil, en aluminium pur (99,95%) pour les petites et moyennes puissances et en barres de cuivre et alliage de cuivre pour les grandes puissances.

I.2 Historique et présentation de l'entreprise

I.2.1 Historique

Electro-industries est issue de la réorganisation du secteur industriel opérée en Algérie entre 1980 et 2000 qui a conduit en 1999 à la restructuration de l'ancienne ENEL (Entreprise Nationale des Industries Electrotechniques) en un certain nombre d'EPE/SPA, parmi lesquelles figure ELECTRO-INDUSTRIES.

L'usine a été réalisée dans le cadre d'un contrat produit en main avec des partenaires allemands, en l'occurrence, SIEMENS pour le produit et FRITZ WERNER pour l'engineering et la construction, l'infrastructure est réalisée par les entreprises algériennes ECOTEC, COSIDER et BATIMETAL.

La production prévue initialement porte sur :

- 5000 Transformateurs de 50 à 2000 KVA.
- 50.000 Moteurs asynchrones triphasés de 0,18 à 400 kW.

a. Entrée en production

- Secteur transformateur 1985.
- Secteur moteur / alternateur 1986
- Ces produits sont fabriqués sous licence SIEMENS jusqu'en 1992.

b. Evolution à 1998

- Extension des capacités de production de transformateurs de 1500 à 5000 unités / an (1991)
- Développement de la gamme de moteurs monophasés
- Développement de moteurs destinés à la climatisation
- Extension verticale de la gamme de transformateurs (2000Kva)
- Extension horizontale de la gamme du moteur en types et variantes.

I.2.2 Présentation Electro-Industries

L'entreprise Electro-Industries est spécialisée dans la fabrication de la commercialisation des transformateurs de distribution et moteurs électriques monophasés et triphasés[20].

Electro-Industrie AZAZGA est une société industrielle issue de la restructuration du secteur de la fabrication du matériel électrique.

Son siège se situe à AZAZGA route nationale N° 12 à 35km du chef-lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou et à 150 Km de la capitale Alger.

Electro-industrie a été transformée juridiquement en société par action en mai 1999. Sa capitale est 4 753 000 000 DA détenus à 100% par la SGPCABELEEC pour le compte de l'état.

Elle est spécialisée dans la fabrication et la commercialisation des transformateurs de distribution et moteurs électriques monophasés et triphasés.

Elle se compose essentiellement de deux unités :

- a. Unité des moteurs et prestation :** la mission globale de cette unité est de fabriquer, assembler et développer les moteurs électriques.
- b. Unité des transformateurs et prestation :** la mission globale de cette unité est de fabriquer, assembler et développer les transformateurs.

I.3 Description du processus de fabrication, organisation des ateliers et leurs fonctions principales

L'unité moteurs Asynchrones et Générateurs électriques (UMAGE) s'occupe de la fabrication des moteurs asynchrones à différentes hauteurs d'axes et les générateurs électriques.

L'UMAGE se compose de différents ateliers

- Ateliers de découpage.
 - Ateliers de moulage sous pression.
 - Ateliers d'usinage.
 - Ateliers de bobinage.
-

➤ Ateliers de montage.

I.3.1 Atelier de découpage

Dans cet atelier que tous les travaux de transformations de tôles utilisées pour la fabrication des différentes pièces sont réalisées.

a. L'entrée de la matière première (la tôle magnétique) :

La tôle magnétique à graines non orientées se présente sous forme de rouleaux isolés au vernis. Il existe plusieurs types de tôles utilisées au niveau de l'usine dont la M530-50A, M800-50A, M800-50HP.

b. Découpage des feuilles de tôles statoriques et rotoriques :

Il y a trois procédés de découpages :

- Découpage automatique successif : Cette procédure se fait à l'aide d'une presse rapide qui découpe les feuilles de tôles rotoriques et statoriques avec l'encochement de ces dernières.
- Découpage semi-automatique : Cette procédure se fait à l'aide d'une machine qui ne fait que découper, ensuite séparer les tôles statoriques.
- Découpage semi-automatique par outils à encocher

Pour les moteurs de 70 à 220mm de hauteur d'axe, on utilise le découpage automatique successif à l'aide d'une presse rapide ou sa vitesse peut aller jusqu'à 300 coups /min. Ce procédé permet de découper les tôles statoriques et rotoriques finis à la fois.

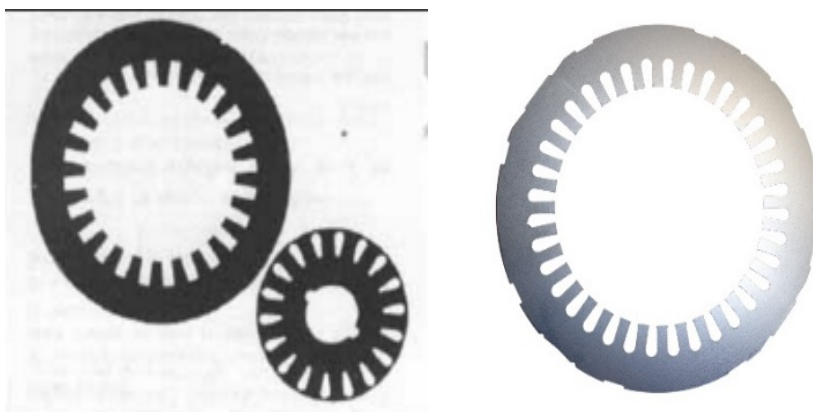


Figure I.1 : Découpage des feuilles de tôles statoriques et rotoriques.

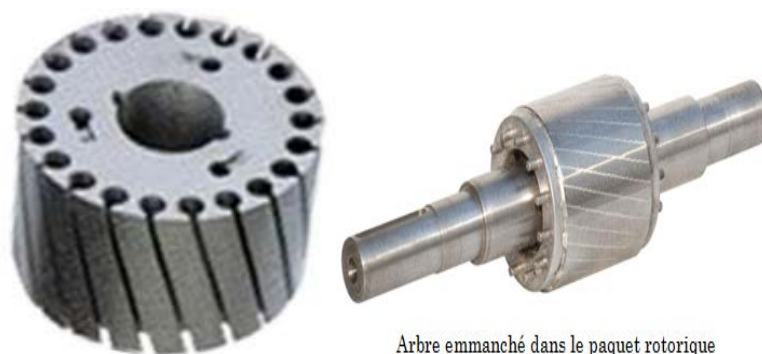
c. L'Empaquetage :

L'empaquetage des paquets statoriques : Il s'effectue après l'empilage des tôles selon le nombre et la longueur du paquet bien déterminés. L'opérateur les place dans un outil monté sur presse à empaqueter pour l'obtention de la longueur demandée suivant les plans, ensuite maintenir avec des agrafes placées dans les rainures pressées à l'aide de quatre vérins.



Figure I.2 : Paquet statorique.

L'emballage des paquets rotoriques : L'empilage des tôles se fait grâce à un opérateur sur un calibre de triage pour obtenir la hauteur du paquet rotorique demandée. Une fois que la hauteur est obtenue l'arbre est placé sur la partie supérieure de la machine via un piston pour qu'il soit emmanché avec pression dans le paquet rotorique (petits moteurs)



Arbre emmanché dans le paquet rotorique

Figure I.3 : Paquet rotorique.

d. La fonderie :

Une fois le paquet rotorique du petit moteur achevé, il est dirigé vers le secteur de fonderie pour injecter de l'aluminium dans les encoches et au même temps former les anneaux de court-circuitage.

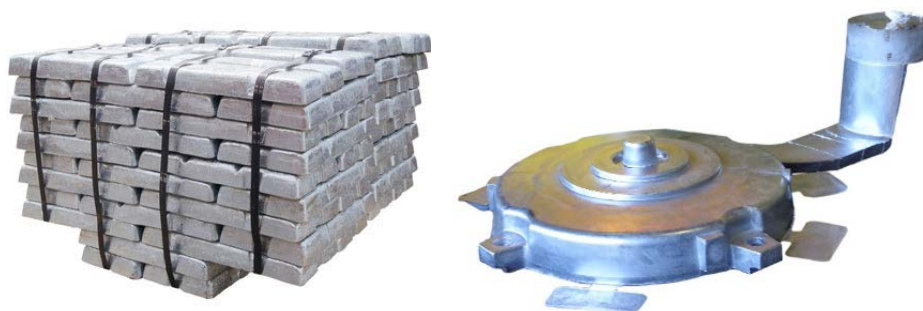


Figure I.4 : Flasques en alliage d'aluminium moulé sous pression.

I.3.2 Atelier d'usinage

Dans cet atelier se fait la fabrication des arbres du rotor ainsi que l'usinage des pièces comme le flasque, rotor, carcasse...

I.3.2.1 Préparation des arbres

La matière première arrive sous forme de barres d'aciers brutes de différents diamètres. Elles sont ensuite découpées à l'aide d'une scie mécanique sous différentes longueurs suivant le type de moteur auquel elles sont destinées.

Les barres découpées sont dirigées vers le centrage et le dressage, ces opérations se font sur une machine à tour parallèle qui fait la mise en longueur, le perçage des tours de centrage et de taraudage.

Vient ensuite le tournage, il se fait grâce à un tour à copier qui fonctionne grâce à un palper qui se déplace sur un Gabarit.

Le tournage finit, vient le tour du fraisage des logements de clavettes qui se fait à l'aide des fraises verticales.



Figure I.5 : Arbre d'un moteur électrique après usinage.

I.3.2.2 Usinage des différentes pièces

Les différentes pièces du moteur se rassemblent au niveau du secteur d'usinage pour la finalisation de leurs diamètres afin qu'à l'assemblage tout va s'emboîter parfaitement.

- La carcasse subit l'opération d'usinage du diamètre intérieur et de l'endroit où les flasques viendront se fixer.
- Les flasques subissent l'opération de tournage des bords de centrage et du logement de roulement et de sa profondeur.
- Le paquet rotorique est usiné à fin que l'entre fer sois parfait.

I.3.3 Atelier bobinage

L'atelier bobinage est divisé en 03sections :

- Section de préparation des éléments d'isolation des bobines.
- Section de préparation des bobines.
- Section de bobinage.

I.3.3.1 les éléments d'isolation du bobinage

- Séparateurs de phases
- Lames intermédiaires
- Câbles de raccordement
- Caniveaux d'encoches
- Cales de fermeture
- Gaines isolantes

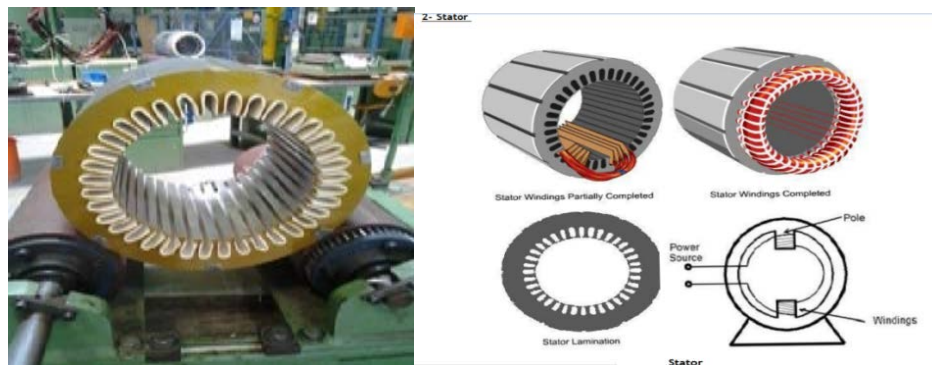


Figure I.6 : Stator avec caniveaux d'encoches isolés

I.3.3.2 Préparation des bobines

L'opérateur de la machine à bobiné, chargé de la préparation de la bobine des stators est munie d'une feuille de calcul qui lui indique les caractéristiques suivantes :

- Type de moteur
- Nombre des bobines
- Diamètre de fil

Les bobines sont réalisées à l'aide d'une bobineuse équipée d'un gabarit, et réglable pour un nombre de spires définit. Une fois le fil est bobiné, le paquet est attaché pour garder sa forme jusqu'à l'étape de bobinage dans le stator.

Le nombre de faisceaux par bobine est déterminé par la formule suivante :

$$Q = \frac{Z(\text{nombre d'encoches})}{m(\text{nombre de phases}) \cdot 2 \cdot p(\text{nombre de poles})}$$

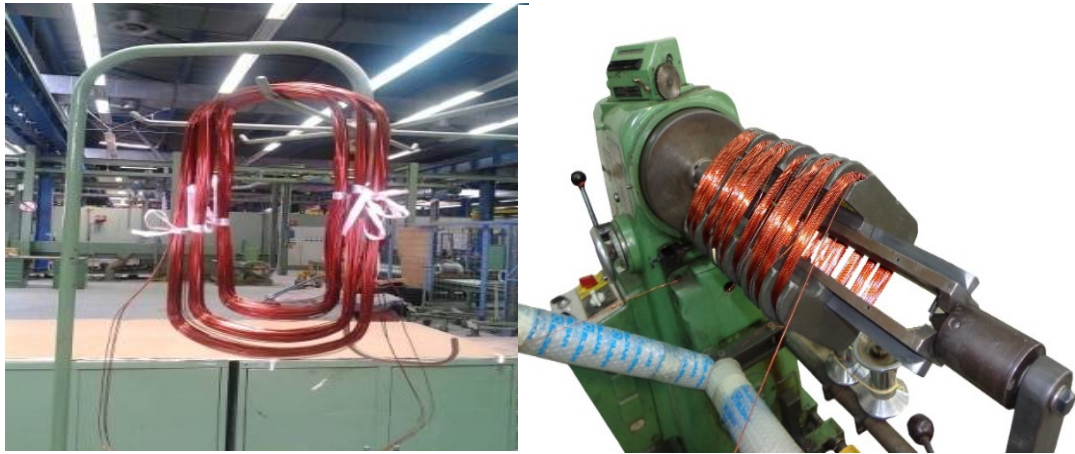


Figure I.7 : bobinage statorique

Le bobineur suit une feuille de calcul qui lui est fourni avec chaque série de stators à bobiner, cette feuille comporte :

Type de moteur - diamètre de file - nombre de pôles - nombre de spires par encoche de stator - schéma de bobinage - type de connexions - nombre de bobines en série par phase - nombre de bobines en parallèle par phases - type d'enroulement - nombre de conducteurs par encoche - câbles de raccordement - caractéristique mécanique de stator (nombre d'encoches, longueur du paquet) - angle d'inclinaison de paquet rotorique.

I.3.3.3 les différentes étapes nécessaires pour le bobinage du stator

- Enfonçage de caniveau d'encoche dans le stator à l'aide d'une machine automatique pour les petits moteurs et manuellement pour les grands moteurs.
- Introduction de bobine de premier étage.
- Enfonçage de lame intermédiaire.
- Introduction de bobine de deuxième étage.
- Emplacement des séparateurs de phases.
- Formation des têtes des bobines manuellement.
- Connexion entre bobines de même phase, pour obtenir 3 bobines de phases différentes, et isolation de point de soudure avec une gaine.
- Connexion des bobines avec câbles de raccordement des phases u, v, w (orange, noir, rouge).

I.3.3.4 Connexions

Une fois les bobines placées dans les encoches, on marque avec un feutre les entrées des bobines, et un autre feutre de couleur différente les sorties.

Après avoir détecté les sorties et les entrées des bobines, on va marquer les entrées et les sorties des phases, qui veut dire les U1U2- V1V2- W1W2 en suivant la formule reliée au nombre d'encoches, le nombre de phases, l'angle géométrique et l'angle électrique.

Après avoir fini ce travail on peut enfin faire des connexions internes et faire les raccordements qui assurent la liaison électrique avec la boîte à bornes.

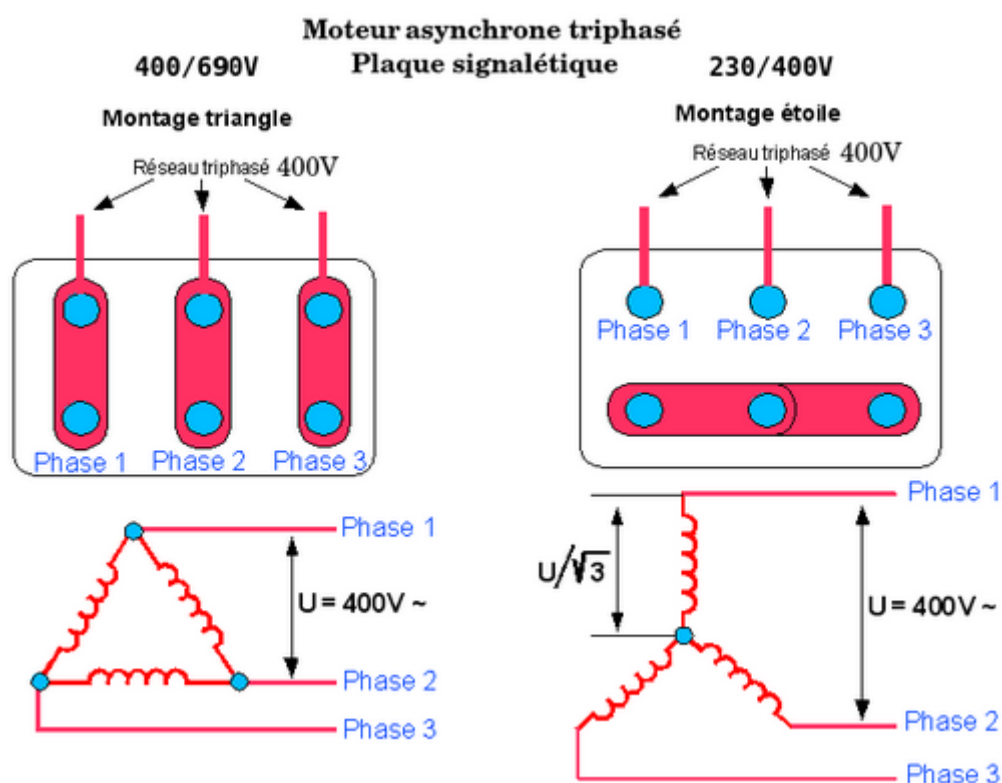


Figure I.8 : les types de connexions de la machine

I.3.4 Atelier de montage

On recense 3 secteurs essentiels dans cet atelier :

I.3.4.1 Secteur équilibrage du rotor

Deux bagues sont emmanchées sur les extrémités du rotor, sur l'une sont mentionnées des angles (0° , 90° , 180° , 127°) ; L'ensemble est placé sur la machine de contrôle.

Un mouvement de rotation est transmis au rotor sur une armoire ou sont affichées les inclinaisons des différentes côtes du rotor, en portant la précision du poids manquant à l'endroit donné par les angles.

L'équilibrage du rotor est réalisé à l'aide de rondelles de différents poids. Après avoir effectué un bon équilibrage, le rotor est retiré de la machine, et les rondelles sont fixées par un marteau à pression.

I.3.4.2 Prés montage

- Mettre de l'huile à l'intérieur de la carcasse ;
- Emmanchement du paquet dans la carcasse avec une presse ;
- Perçage de l'ensemble pour une liaison de la carcasse avec le paquet à l'aide d'ergots ;
- Fraisage des pattes de la carcasse ;
- Usinage des bords de centrage.

I.3.4.3 Secteur montage

Dans ce secteur sont effectuées les opérations suivantes :

- Mise en place du couvercle du palier intérieur coté Bs pour assurer une bonne étanchéité ;
- Emmanchement des roulements déjà graissés, cotés As et Bs avec une presse verticale, et emplacement de clavette coté As ;
- Visser le couvercle de palier sur le flasque cela permet de cerner le roulement entre ces deux pièces ;
- Mise en place de la clavette cotée Bs et emmanchement du ventilateur avec la même presse puis insertion de la bague ;
- Intégration du stator complet dans le stator bobiné et fixation du flasque coté Bs avec des vis ;
- Mise en place des rondelles (rondelles de compensation et rondelles élastique) sur le flasque, coté As, pour éviter le jeu axial du rotor ;
- Fixation du flasque sur la carcasse avec des vis, ainsi que le montage du capot de la ventilation ;
- Préparation de la boîte à borne et fixation des câbles de raccordement sur la plaque à borne. Et puis, le moteur sera remis à la plateforme d'essais.

Après la finalisation des différents processus de fabrication du moteur asynchrone en passe aux essais des moteurs asynchrone.

I.4. Les essais des moteurs asynchrones triphasés

Une fois le montage finit le moteur sera remis aux plates-formes d'essais pour subir les différentes opérations de contrôle.

a. Esses à vide :

Le moteur est alimenté par une tension nominale U_n puis on mesure le courant à vide I_0 , la puissance à vide P_0 le facteur de puissance à vide $\cos\phi$.

b. Esses en court-circuit :

Le rotor est bloqué puis le moteur est alimenté sous un courant nominal I_n pour mesurer la tension de court-circuit U_{cc} .

La puissance de court-circuit p_{cc} et le facteur de puissance $\cos\phi_{cc}$.

c. Essais de haute tentions :

Cet essai a pour objectif de contrôler la bonne isolation entre phases.

I.4 Conclusion

Le travail que nous avons réalisé au sein de l'entreprise (E.I) nous a été bénéfique sur plusieurs aspects, il nous a permis non seulement d'approfondir nos connaissances dans le domaine de la technologie de fabrication des moteurs mais aussi de nous familiariser avec le milieu industriel.

L'étude qu'on a fait sur les moteurs nous a donné l'occasion de voir les processus de fabrication et d'apprécier les différentes étapes de la matière première jusqu'au produit fini, ou un contrôle systématique et établi sur chaque appareil afin d'assurer de sa conformité au plan de fabrication et de son fonctionnement en générale.

Chapitre II

Etat de l'art des défauts des MAS et de leurs techniques de diagnostic

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons le système étudié qui se limite, dans notre cas, à la machine asynchrone triphasée à cage. Après avoir rappelé les éléments de constitution de cette machine, nous effectuons une analyse des différents défauts pouvant survenir sur chacun d'eux. Nous présentons ensuite des divers outils issus des techniques de traitement du signal pouvant être utilisés pour la détection d'un défaut électrique et/ou mécanique. Pour finir, nous discutons des méthodes de diagnostic actuellement appliquées à la machine asynchrone en précisant leurs avantages et leurs inconvénients.

II.2 Constitution de la machine asynchrone MAS

Du point de vue mécanique, la machine asynchrone triphasée est composée de trois parties distinctes :

- Le stator, partie fixe de la machine ou est connecté l'alimentation électrique, elle est constituée de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- 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.

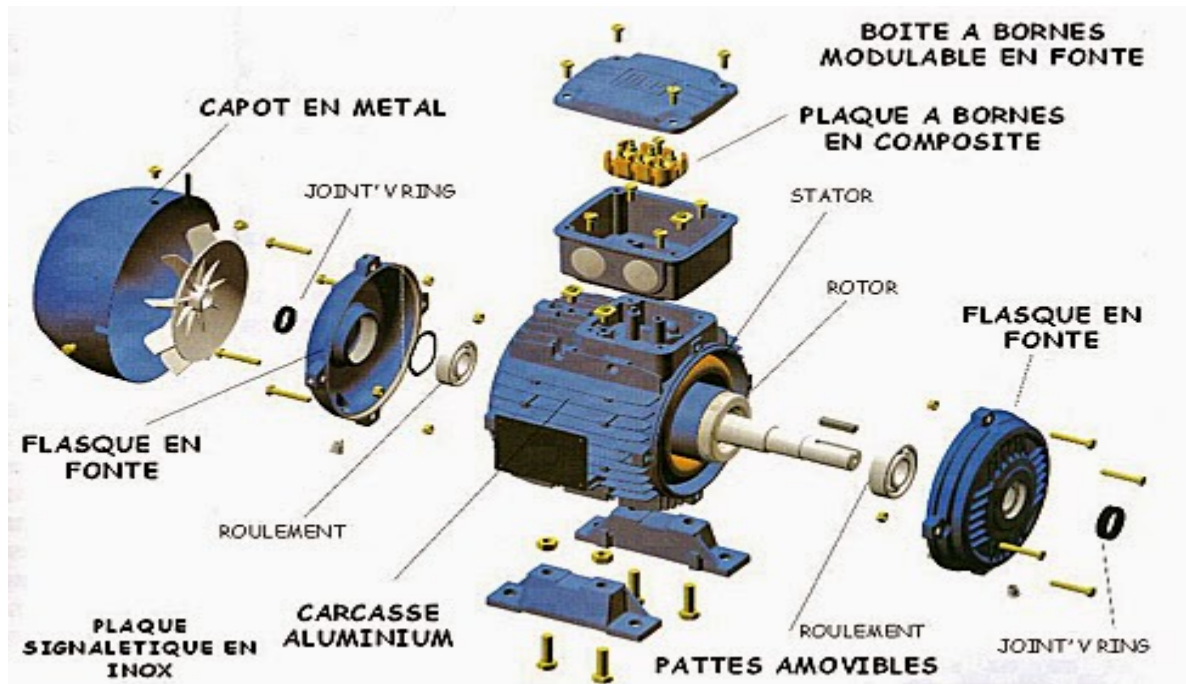


Figure II.1: Machine asynchrone triphasé

II.2.1 Stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importantes, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Les enroulements statoriques sont placés dans des encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriquée, ondulés ou encore concentriques [1].



Figure II.2: Stator d'une machine asynchrone triphasé

II.2.2 Rotor

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors de machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil.

Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium.

Il existe différentes structures de rotor à cage qui dépend principalement de la taille du moteur et de l'application qu'il en sera fait. Nous pouvons visualiser l'arbre sur lequel les tôles sont empilées, les deux anneaux de court-circuit ainsi que les barres d'aluminium formant la cage d'écureuil. Très souvent, ces barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone. L'isolation des barres avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles. De plus, la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre[2].

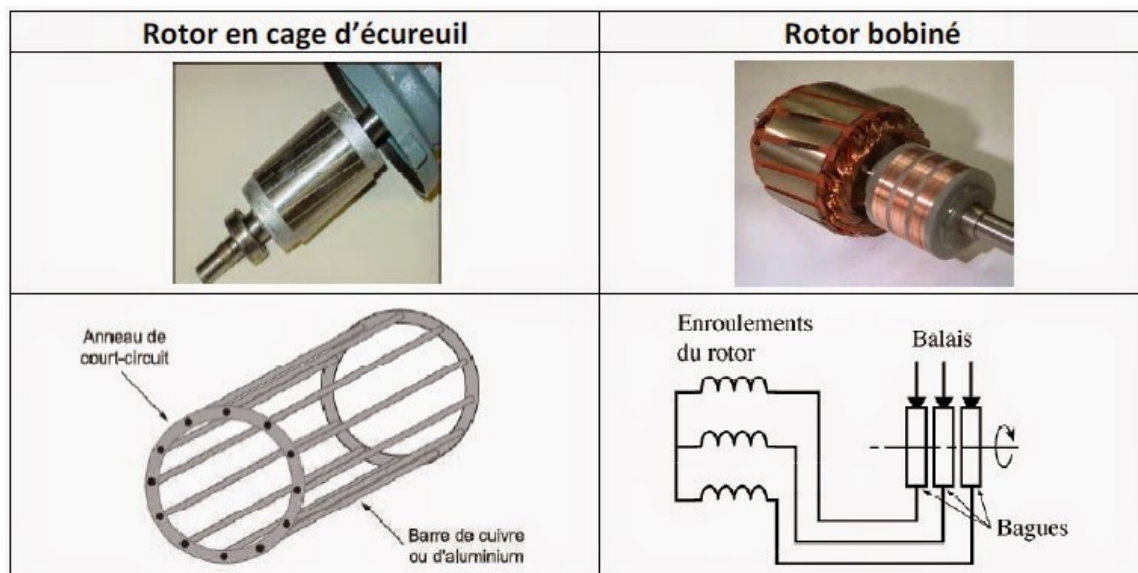


Figure II.3 : Les différents types de rotor

II.2.3 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[3].

II.3 Etude statistique sur les défauts des machines asynchrone

Les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le **Tableau II.1**[4].

Défaillances des machines électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le stator et rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
		Mouvement des enroulements et des toles	
		Electrique	Défaillance au niveau de l'isolon
			Rupture de barre
	Défaillance au niveau du circuit magnitique		
	Externe	Mécanique	Charge osillante
			Surcharge de la machine
			Défaut de montage
		Environnementale	Humidité
			température
			Propreté
		Electrique	Flucturation de la tention
			Source de tention déséquilibrées
Réseau bruité			

Tableau II.1 : Défauts des machines électriques selon leurs origines

Statistiquement, il est difficile de donner des informations exactes des défaillances de machine asynchrone par ce que les défauts ne sont pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance [5].

Plusieurs études statistiques ont été effectuées, à partir des années 80 jusqu'à présent, sur les défauts dans les machines asynchrones de moyenne et grande puissance. Cependant, il est toujours difficile de donner une répartition exacte des défaillances dans les différentes parties de la machine, parce qu'elle dépend de plusieurs facteurs tels que le type de la machine, le type d'alimentation, l'environnement d'application et autres [6].

Une étude statistique a été effectuée en 1988 par la compagnie d'assurance allemande Allianz sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50kW à 200kW) [6].

Leur répartition dans les différentes parties du moteur, illustrée dans la figure II.4, a montré que la majorité des pannes c'est des pannes mécaniques au niveau des roulements 41%, 37% au stator, 10% au rotor et 12% dans les autres [7].

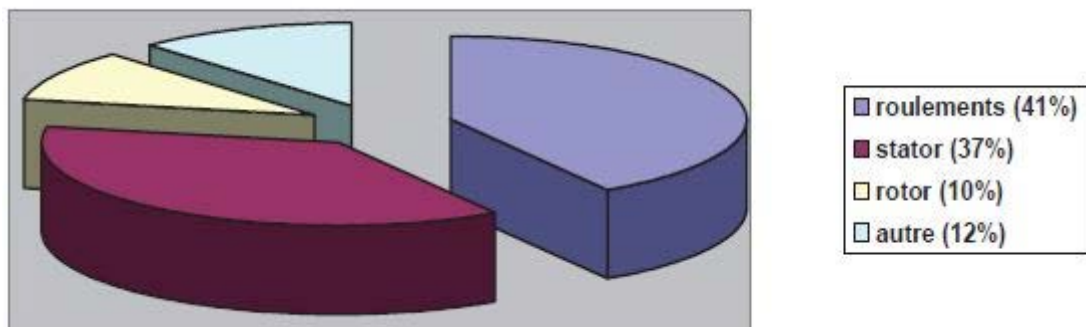


Figure II.4 : Répartition des défauts dans les machines de moyennes puissances en 1988

Une deuxième étude statistique récente, effectuée par Bonnet en 2008, sur des machines asynchrones de grande puissance travaillant dans l'industrie pétrochimique. Le résultat de cette enquête, présenté dans la figure (II.5), montre que 69% de défauts se situent dans les roulements, 21% au stator, 7% au rotor et 3% aux accouplements d'arbre [8].

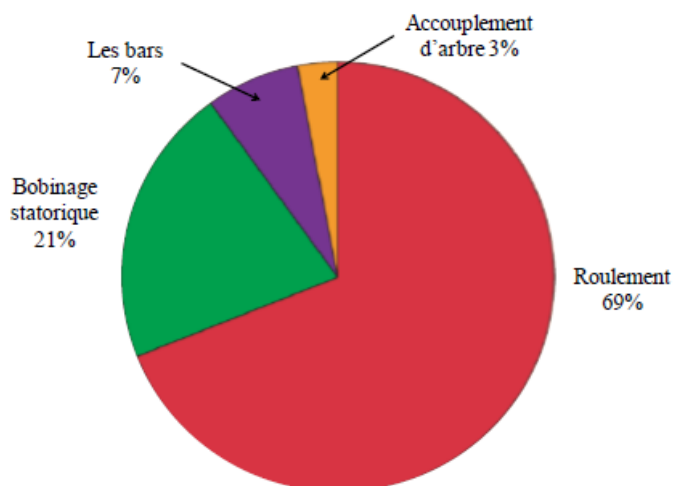


Figure II.5 : Distribution des défauts dans les machines asynchrones de grande puissance

II.4 Types des défauts

Dans ce paragraphe on présente un aperçu sur les différents défauts des machines électriques, leurs origines et leur classification.

Les origines de défauts dans les machines électriques sont multiples. Ils peuvent provenir des problèmes de fabrication, d'isolation électrique, de surchauffe du moteur, de vieillissement des composants, d'environnements humides ou autres. Ces différents défauts peuvent survenir sur le stator ainsi que sur le rotor, d'où nous allons les classer ci-après en deux catégories : défaut d'ordre électrique et défaut d'ordre mécanique.

II.4.1 Défauts d'ordre électrique

Les défauts d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine. Ces défaillances peuvent apparaître au niveau des circuits électriques statoriques et rotoriques.

II.4.1.1 Défauts au stator

Le stator de la machine est constitué d'une culasse ferromagnétique et des enroulements logés dans ses encoches. D'où, les défauts au stator peuvent se situer au niveau de la culasse ou des enroulements.

Concernant les défauts de la culasse statorique, il a été déclaré qu'ils sont relativement rares pour les petites et grandes machines [7].

Les pannes dues aux défauts des enroulements statorique représentent entre 25% et 35% des pannes totales [9]. Les défauts aux bobinages sont dus principalement à la détérioration des isolants des conducteurs lors du fonctionnement de la machine. Dans la plupart des cas, cette dégradation entraîne un court-circuit inter-spores et qui peut se dégénérer en des court-circuit inter-bobines, interphases et entre phases et neutre, jusqu'à l'arrêt complet probable de la

machine. Ces trois types de court-circuit sont représentés dans la figure (II.6). Un défaut de court-circuit inter-spices produit une valeur très importante du courant circulant dans la branche court-circuitée de la phase ce qui résulte d'un échauffement excessif des conducteurs. Dans ses conditions de fonctionnement, le moteur peut tomber en panne après quelques minutes de sa mise en service. En effet, et selon une règle générale, toute augmentation de 10°C de température par rapport à sa valeur nominale, réduit la durée de vie des conducteurs deux fois plus vite [10].

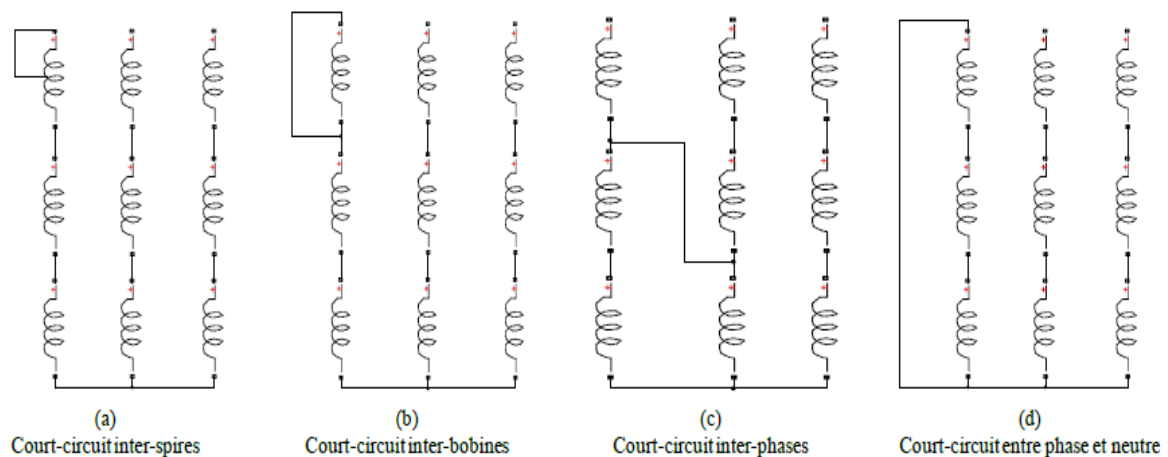


Figure II.6 : Représentation de court-circuit inter-spices

Les origines les plus fréquents des défauts du bobinage statorique, selon [11] peuvent être classées en quatre classes :

- Origines thermiques tels que : l'augmentation de la température du bobinage et de la culasse statorique, le vieillissement thermique naturel du matériau.
- Origines électriques tels que : les décharges électriques partielles, les courts-circuits, les courants de démarrage.
- Origines mécaniques tels que : les contraintes mécaniques au démarrage, les fuites dans le système de refroidissement, le défaut d'excentricité.
- Origines environnementales tels que : la contamination causée par les hydrocarbures et l'humidité, la température ambiante élevée.

II.4.1.2 Défauts au rotor

Contrairement aux défauts statoriques, les défauts au rotor dépendent du type de la machine considérée, parmi lesquels on peut citer les plus importants : [4].

- Défauts de roulements mécaniques,
- Excentricité du rotor,
- Rupture de barres rotorique pour les machines asynchrones à cage,
- Défauts dans les enroulements rotorique pour les machines synchrones classiques, asynchrones à rotor bobiné ou à courant continu,

- Défaut de démagnétisation pour les machines synchrones à aimants permanents.

Les défauts du rotor bobiné sont les mêmes que ceux du stator. Pour le rotor à cage les défauts les plus rencontrés peuvent être, voir figure (II.7) ; comme :

- ✓ Rupture d'une barre rotorique (ou éventuellement plusieurs barres).
- ✓ Rupture de l'anneau de court-circuit [11].

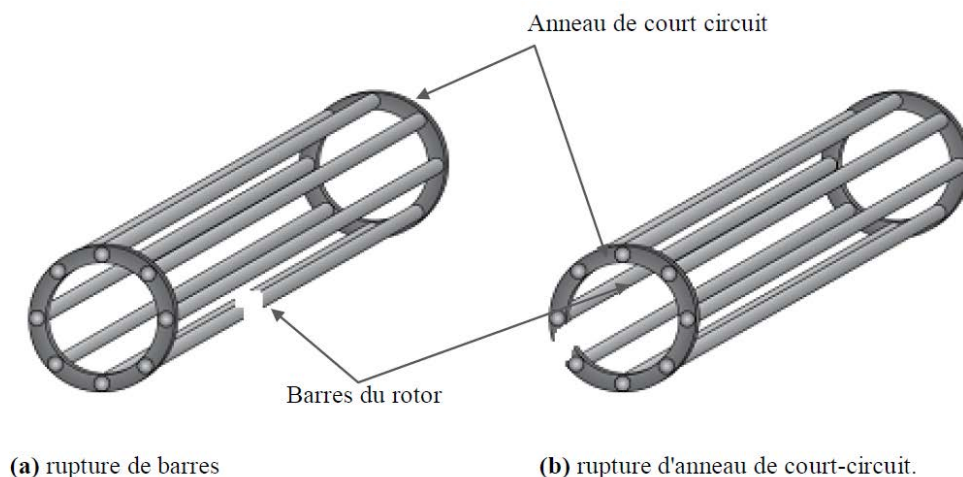


Figure II.7 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil.

II.4.2 Défauts d'ordre mécanique

L'expérience requise sur les machines asynchrones a montré que les défauts mécaniques tiennent une grande place dans les défauts de la machine, dans ce type de défaillance on peut citer :

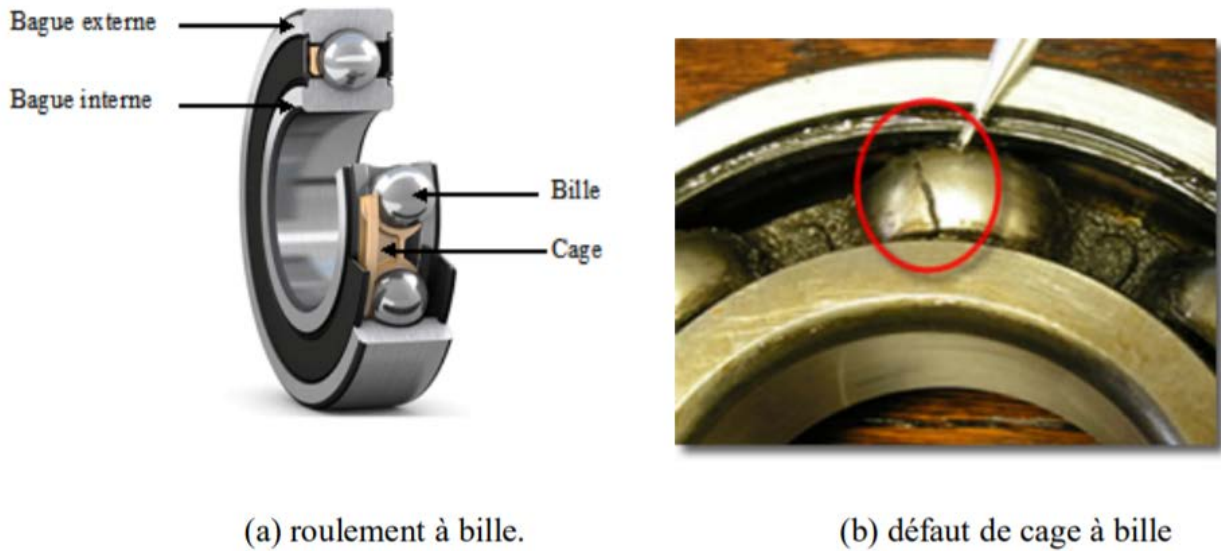
Les défauts de roulement, de flasque, de l'arbre, et d'excentricité (dynamique, statique et mixe), nous allons définir brièvement ces défauts.

II.4.2.1 Défauts de roulements

La plupart des défauts observés sur le terrain sont liés à l'usure abrasive, à l'humidité, à la corrosion, au montage incorrect, à des ajustements incorrects des bagues sur l'arbre ou dans le palier, au glissement des éléments roulants, à une pollution imprévue ou à la défaillance de la cage, des joints ou de la lubrification, une charge excessive [12].

Ils entraînent des effets mécaniques dans les machines tels que l'augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Ces types de défaut induisent également des variations (oscillations) dans le couple de charge de la machine asynchrone. Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor [13].

La figure (II.8(a)) présente une vue coupe d'un roulement à billes et la Figure (II.8(b)) présente un défaut de cage à bille.



(a) roulement à bille.

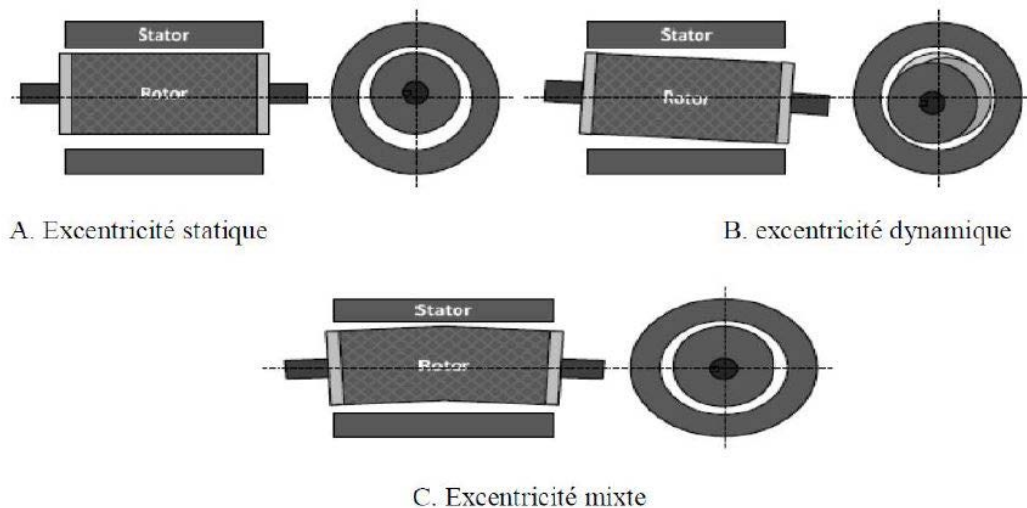
(b) défaut de cage à bille

Figure II.8 : Roulement à bille.

II.4.2.2 Excentricité

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries qui sont naturelles celles-ci relèvent de trois catégories qui sont pour l'essentiel [14].

- Excentricité statique.
- Excentricité dynamique.
- Excentricité mixte.

**Figure II.9 :** Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte

- **L'Excentricité statique :** 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, elle, à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator.
- **L'Excentricité mixte** : est la somme des deux cas présentés ci-avant.

II.4.2.3 Défaillances du flasque

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [2].

II.4.2.4 Défaillances de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des micros fissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique ou dynamique peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [15].

II.5 Intérêt du diagnostic

Pendant leurs fonctionnements, les moteurs peuvent être exposés à différents environnements hostiles ou avoir des défauts de fabrications. Les différents défauts internes du moteur (par exemple, court-circuit des fils de moteur, les courts-circuits entre spires, roulements cassés, excentricité du rotor, ruptures de barres au rotor), et les différents défauts externes du moteur (par exemple, coupure de phase, surcharge mécanique, rotor bloqué, surcharge électrique) peuvent se produire tôt ou tard. En outre, la grande variété des environnements et conditions auxquels sont exposés les moteurs accélère leur vieillissement et les assujettit aux défauts prématurés et évolutifs. Ces types de défauts se rapportent habituellement à la détérioration progressive de la machine qui peut mener à l'arrêt de celle-ci s'ils ne sont pas détectés au moment opportun.

Le problème des ruptures de barres dans les moteurs des stations de pompage offshore qui a été à l'origine des premiers travaux de recherche sur le diagnostic proprement dit des machines asynchrones. De nombreux travaux ont suivi dans la même voie, ou ont été initiés pour le

diagnostic des autres défauts de la machine, comme l'excentricité du rotor, les courts-circuits ou encore l'usure des roulements [16].

II.6 Méthodes de diagnostic basé sur le traitement de signal

Nous présentons ici les méthodes classiques d'estimation de la Densité Spectrale de Puissance d'un signal, notée DSP, fondées sur la transformée de Fourier discrète dont nous rappelons les équations dans la section II.6.1. Nous donnons par la suite les caractéristiques importantes d'un estimateur que sont le biais et la variance ainsi que leur impact sur le spectre fréquentiel résultant. Cela nous amènera à présenter quelques méthodes permettant de diminuer la variance pour obtenir une meilleure estimation de la densité spectrale de puissance du signal observé. Rappelons, au préalable, que toutes les méthodes présentées font partie de la famille des méthodes d'estimation spectrale non-paramétriques.

II.6.1 Transformée de Fourier

II.6.1.1 Transformée de Fourier discrète

Selon [15], La transformée de Fourier discrète, généralement notée TFD, d'une suite finie de P échantillons $\{P_s(0), P_s(1), \dots, P_s(P-1)\}$ se calcul grâce à la relation :

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) e^{-\frac{2\pi nk}{N}} \quad \text{pour } k = 0, \dots, N-1 \quad (\text{II.1})$$

Où le terme N représente le nombre de points de calcul de la TFD. Ce terme joue sur la précision du tracé alors que le terme P est lié à ce que l'on appelle la résolution en fréquence. En pratique, on essaye d'avoir un nombre de point P de la suite $P_s(n)$ supérieur ou égal au nombre de point de la TFD ($P \geq N$). Si ce n'est pas le cas, on utilise une technique appelée *zero-padding* qui consiste à compléter la suite $P_s(n)$ avec $(N - P)$ zéros, ce qui permet d'obtenir autant de point pour la suite temporelle que la suite fréquentielle. La transformée de Fourier Inverse, notée ITFD, se calcul grâce à la relation :

$$P_s(n) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (\text{II.2})$$

En décomposant l'exponentielle de l'équation (I.1), le nombre complexe $F(k)$ peut se mettre sous la forme :

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) - j \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (\text{II.3})$$

Cette équation nous permet ainsi de définir la transformée de Fourier en cosinus, notée TDF-cos grâce à l'équation suivante :

$$F_c(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (\text{II.4})$$

Ainsi que la transformée de Fourier en sinus, notée TFD-sin, calculée avec l'équation :

$$F_s(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (\text{II.5})$$

Ces deux transformées permettent d'obtenir des temps de calcul réduits lorsqu'elles sont implantées dans un algorithme de calcul.

II.6.1.2 Transformée de Fourier rapide

La transformée de Fourier rapide, notée TFR, est un algorithme de calcul rapide de la TFD élaborée en 1965 par *J. W. Cooley* et *J. W. Tuckey*. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la TFD, de : $\log_2(N)$

$$\text{Gain} = \frac{N}{\log_2(N)} \quad (\text{II.6})$$

Cette transformée de Fourier rapide est très utilisée lorsqu'il est indispensable d'obtenir une analyse fréquentielle "en ligne" dans certains processus au travers d'une fenêtre glissante d'observation [15].

II.6.2 Périodogramme

II.6.2.1 Périodogramme simple

En considérant une suite de variables aléatoires réelle de longueur quelconque $P_s(n)$, nous pouvons montrer que la densité spectrale de puissance $\hat{P}_s(f)$ de la suite $P_s(n)$, sous l'hypothèse d'ergodicité, repose sur l'équation [17] :

$$\hat{P}_s(f) = \lim_{N \rightarrow \infty} E \left[\frac{1}{(2N+1)} \left| \sum_{n=-N}^N P_s(n) e^{-j2\pi fn} \right|^2 \right] \quad (\text{II.7})$$

Avec $-\frac{1}{2T} \leq f \leq \frac{1}{2T}$ et T la période d'échantillonnage. La nécessité d'appliquer l'espérance mathématique E provient du caractère aléatoire des signaux. En pratique, pour un ensemble de données $P_s(n)$ disponibles de $n = 0$ à $N - 1$, le calcul de la DSP s'effectue avec la relation :

$$\hat{P}_s(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) e^{-j2\pi fn} \right|^2 \quad (\text{II.8})$$

Cet estimateur est appelé périodogramme. Nous pouvons noter qu'il est proportionnel au carré de l'amplitude de la TFD de la séquence observée (équation II.1). L'estimation de la DSP peut être vue comme un filtrage du signal d'entrée par un banc de filtres du type passe-bande, dont chaque filtre élémentaire possède la réponse fréquentielle $H(f)$ suivante [17] :

$$H(f) = \frac{\sin(N\pi(f-f_0))}{N \sin(\pi(f-f_0))} e^{j(N-1)\pi(f-f_0)} \quad (\text{II.9})$$

Le signal de sortie d'un filtre élémentaire est ensuite échantillonné et son amplitude est élevée au carré pour déterminer la puissance de sa bande spectrale. La largeur de bande à -3 dB de ces filtres est d'environ $\frac{1}{N}$. Lorsque N tend vers l'infini, la puissance de sortie du filtre correspond à celle d'une composante spectrale de fréquence f_0 du signal d'entrée. Dans ce cas, l'estimateur est non biaisé, ce qui n'est pas le cas lorsque le nombre d'échantillons N est connu.

II.6.2.2 Périodogramme modifié

Le fait de se limiter à un nombre d'échantillons N peut être vu comme la multiplication terme à terme de la totalité du signal par la suite $w(n) = \mathbf{1}_{\{0, \dots, N-1\}}(n)$. On donne à cette dernière le nom de fenêtre rectangulaire. Ce fenêtrage introduit des ondulations parasites (noyau de Dirichlet) dans le spectre fréquentiel résultant comme il l'est montré dans [17].

Il est donc très courant d'utiliser des fenêtres dites de pondération pour permettre une meilleure visualisation des composantes du spectre fréquentiel. En conséquence, l'expression de la DSP donnée à l'équation (II.8) devient :

$$\hat{P}_{ps}(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} W(n) P_s(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \quad (\text{II.10})$$

Le terme $w(n)$ rajouté dans l'équation représente l'expression mathématique de la fenêtre de pondération choisie. Les fenêtres de pondération les plus connues sont la fenêtre de "Hanning", celle de "Hamming" ou encore celle de "Blackmann". Chacune d'elle permet de choisir le rapport souhaité entre la largeur du lobe principal et l'atténuation de la hauteur du plus grand lobe secondaire du spectre fréquentiel.

Le périodogramme simple ou le périodogramme modifié comporte deux caractéristiques importantes : le biais et la variance. Ces deux caractéristiques, décrites ci-après, jouent un rôle très important dans l'estimation du spectre fréquentiel.

II.6.3 Estimateurs spectraux à variance réduite

Nous avons vu précédemment que le nombre de points N du signal à analyser n'avait aucune influence sur la variance du périodogramme. Une solution à ce problème est l'utilisation d'estimateurs spectraux à variance réduite tels que le périodogramme de Bartlett ou encore le périodogramme de Welch dont nous présentons les caractéristiques ci-après.

II.6.3.1 La méthode de Bartlett

Le signal de taille N est divisé en S sections de M échantillons. On évalue sur chaque section s l'estimateur spectral par la méthode du périodogramme modifié (équation II.10) grâce à la relation :

$$\hat{P}_{ps}^s(f) = \frac{1}{M} \left| \sum_{n=0}^{M-1} W(n) P_s(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \quad (\text{II.11})$$

L'estimation moyennée devient alors :

$$\hat{P}_{ps}^{Bar}(f) = \frac{1}{S} \sum_{s=0}^{S-1} P_{ps}(f) \quad (\text{II.12})$$

Dans ce cas, la variance est approximativement égale à celle du périodogramme divisée par le nombre de sections S . Si, pour un nombre de points N constant, nous augmentons le nombre de sections S , nous constatons que la variance du périodogramme de Bartlett diminue. L'utilisation de cette méthode implique une résolution fréquentielle plus faible par rapport à un calcul avec le périodogramme modifié.

II.6.3.2 La méthode de Welch

La méthode de Welch est un autre type d'estimateur qui exploite le périodogramme modifié [13]. Elle est basée sur la même idée que la méthode de Bartlett. Cependant, la différence réside dans le fait que les segments S peuvent se chevaucher dans un rapport allant généralement de 50% à 75%. Le calcul du périodogramme de chaque section s s'effectue grâce à la relation mathématique suivante :

$$\hat{P}_{ps}^s(f) = \frac{1}{M} \left| \sum_{n=0}^{M-1} W(n) P_s(n + (s-1)C) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \quad (\text{II.13})$$

Avec $1 \leq s \leq S$, et C le nombre d'échantillons permettant le chevauchement avec $C \leq M$.

L'estimateur de Welch se calcule ensuite avec la relation :

$$\hat{P}_{ps}^{Wel}(f) = \frac{1}{S} \sum_{s=0}^{S-1} P_{ps}(f) \quad (\text{II.14})$$

En autorisant le recouvrement des séquences, nous pouvons augmenter le nombre de segments S pour une taille N donnée. Cette solution permet non seulement de réduire la variance de l'estimateur mais aussi d'augmenter la résolution en fréquence en choisissant un nombre d'échantillons M plus grand que celui utilisé avec la méthode de Bartlett. Il a été montré que, si le chevauchement des segments est de 50%, la variance de l'estimateur de Welch est approximativement égale à 9/16 de la variance de l'estimateur de Bartlett [18].

Cette méthode est très utilisée de nos jours et beaucoup d'auteurs en ont montré l'intérêt et l'efficacité. Il existe d'autres estimateurs pour calculer la densité spectrale de puissance d'un signal. Nous pouvons citer par exemple le corrélogramme qui nécessite l'estimation de la séquence d'autocorrélation du signal à analyser avant le calcul de la DSP, ou encore la méthode de Blackman-Tukey, décrite dans [18].

II.7 Diagnostic des défauts par le suivi des grandeurs mesurables

A ce jour, c'est l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables qui est le plus souvent utilisée pour le diagnostic de défaut rotorique. Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone peuvent être : [15]

- Les courants absorbés ;

- Le flux de dispersion ;
- La tension d'alimentation ;
- La tension de neutre (neutre alimentation - neutre machine) ;
- Le couple électromagnétique ;
- La vitesse rotorique ;
- Les vibrations ;

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

II.7.1 Analyse fréquentielle des courants statoriques et du flux de dispersion

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone.

Nous savons que le suivi de l'amplitude des composantes caractéristiques de fréquence $(1 \pm 2k) f_s$ dans le spectre du courant permet de se renseigner sur l'état de la cage rotorique. A titre d'exemple, nous présentons sur les figures (II.10(a)) et (II.10(b)) le spectre du courant statorique lorsque la machine fonctionne avec un rotor sain et un rotor défaillant (Une barre cassée). Nous apercevons une nette augmentation de l'amplitude de ces composantes, ce qui traduit la présence d'un défaut au sein de la cage d'écureuil. Certains auteurs se sont penchés sur l'analyse du flux de dispersion de la machine asynchrone pour la détection des courts-circuits entre spires statoriques. Ils ont montré que l'apparition de ce type de défaut induisait des composantes additionnelles dans le spectre fréquentiel du flux de dispersion [15]. Cette nouvelle approche permet de détecter, tant un défaut statorique, qu'un défaut rotorique en utilisant un capteur de flux relativement peu coûteux.

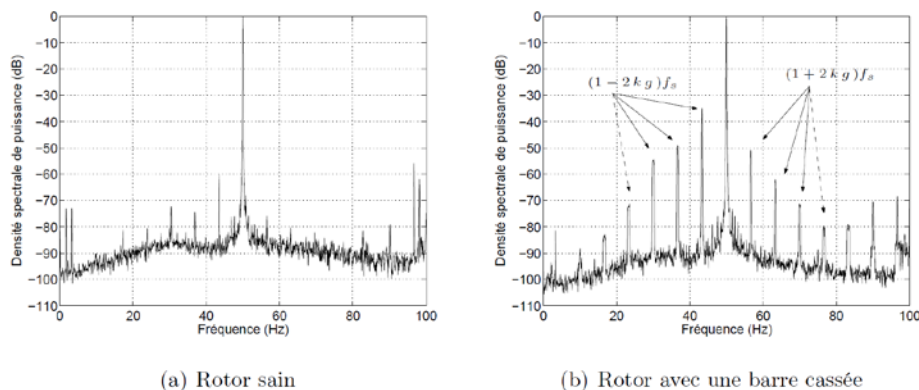


Figure II.10 : Spectre du courant statorique (Résultats expérimentaux)

II.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré pour la présentation et l'étude des différentes parties constituant la machine asynchrone triphasée à cage, à savoir (stator, rotor, paliers). Ainsi, des études statistiques, sur les défaillances qui se produisent au niveau de la machines, ont été exposées.

Pour la plupart de ces défaillances, elles induisent un arrêt intempestif de la machine, c'est pour pallier ce problème que le diagnostic de défaut a pris une importance de plus en plus grandissante dans les milieux industriels. Cet essor a fait naître des techniques de diagnostics dans le but de se prémunir de ces arrêts imprévisibles. Nous avons vu que la détection d'un défaut, qu'il soit mécanique ou électrique, s'effectue majoritairement par la surveillance de l'amplitude de composantes spécifiques dans le spectre fréquentiel d'une grandeur mesurable. C'est pour cette raison que nous avons présenté quelques estimateurs classiques de la densité spectrale de puissance d'un signal temporel

Dans la continuité de la présentation, nous avons abordé les méthodes de détection existantes en discutant de leurs atouts et de leurs faiblesses. En effet, ces techniques montrent quelques avantages dans des applications particulières où la vitesse rotorique change rapidement.

Chapitre III

Conception assistée par ordinateur de la machine Asynchrone 4KW

III.1 Introduction

Les moteurs asynchrones couvrent un nombre important de structure de moteurs (monophasés, triphasés, bobines, a cage simple ou double, etc.), de même, la puissance de la gamme industrielle des moteurs s'étend de quelques watts à plusieurs mégawatts. Cependant la conception des petites machines, comme celle des grandes, fait appel à des contraintes spécifiques et ne peut donc être traitée dans le cadre général.

Nous limiterons notre travail sur les moteurs asynchrone à cage de taille moyenne. Alors nous proposons dans cette partie une étude détaillée de la machine asynchrone de 4kW par un logiciel de conception des machines le plus avancé dans le domaine des conceptions assistées par ordinateur CAO. Il s'agit du logiciel « Maxwell2D/3D » leader en simulation des phénomènes électromagnétiques par la méthode des éléments finis.

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des calculs en régimes transitoires. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à aux besoins d'étude des machines électriques.

Le logiciel est équipé d'un module de calcul analytique RMxpert permettant de calculer les paramètres détaillés de la machine. Ce logiciel CAO permet également de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite « bande de roulement » pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage.

III.2 Présentation du logiciel ANSYS Maxwell2D/3D

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

outils de simulation de circuits intégrés et de systèmes, on peut comprendre la performance des systèmes électromécaniques bien avant de fabriquer un prototype physique. Ce laboratoire électromagnétique virtuel vous donne un avantage concurrentiel important : commercialisation plus rapide, réduction des coûts et amélioration de la performance du système.

Maxwell comprend les solveurs suivants :[18]

- Magnétique transitoire avec mouvement rigide
- Électromagnétique fréquentiel
- Magnétostatique
- Electrostatique
- DC Conduction
- Transitoire électrique
- Interfaces de conception experte pour les machines et transformateurs électriques
- ANSYS Simplorer Entry (simulation des circuits et systèmes)

III.3 Présentation du module 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 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 pas mal de temps [1].

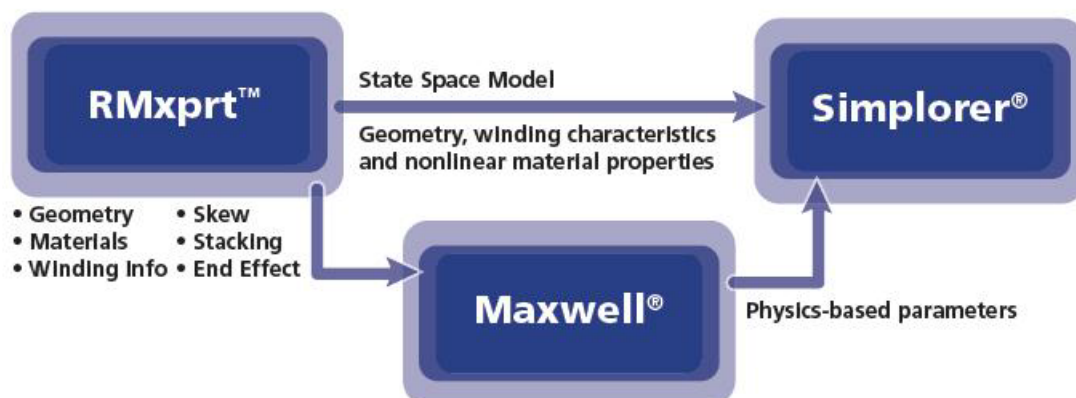


Figure III.1 : Etapes d'utilisation de Maxwell pour la MAS

III.4 Etapes de la conception sur le module RMxprt

Avant de commencer la conception nous allons d'abord présenter les paramètres réels de la machine sur laquelle nous allons faire notre étude.

III.4.1 Paramètres de la machine

Notre étude est basée sur une machine asynchrone à cage qui est disposée de ces caractéristiques et paramètres qui sont présentés dans le tableau suivant :

Nom	Valeur	Unité
Type de la machine	Triphasée	/
Courant nominal	8.5	A
Tension nominal	400	V
Vitesse de rotation	1440	Tr/min
Fréquence	50	Hz
Puissance nominal	4	Kw
Cos(φ)	0.81	/
Branchement des bobines	Triangle	/
Rendement	84	%
Nombre de pôles	4	/

Tableau III.1 : Paramètres nominaux de la machine 4kW

Les dimensions principales de la machine (stator, rotor) sont présentées dans les tableaux III.2, III.3 et III.4 :

Nom	Valeur	Unité
Diamètre intérieur	108.5	mm
Diamètre extérieur	170	mm
Longueur de stator	120	mm
Facteur d'empilement	0.95	/
Nombre d'encoche	36	/
Nombre de conducteurs par encoche	49	/
Type du matériau	M800-50A	/

Tableau III.2 : Dimensions du Stator

Nom	Valeur	Unité
Diamètre intérieur	37	mm
Diamètre extérieur	108.5	mm
Longueur	120	mm
Facteur d'empilement	0.95	/

Nombre d'encoche	28	/
Type du matériau	M800-50A	/

Tableau III.3 : Dimensions du Rotor

Les paramètres des barres rotoriques :

Nom	Valeur	Unité
Type du matériau	Aluminium	/
Hauteur de l'extrémité de l'anneau	13.271	mm
Longueur de l'extrémité de l'anneau	12	mm

Tableau III.4 : Dimensions des barres rotoriques

III.4.2 Etape de Conception

La construction du modèle d'une machine asynchrone, commence par choisir le type, puis spécifier ses paramètres via RMxprt.

Ensuite, on commence à définir la géométrie, les dimensions de la machine et les propriétés du matériau.

La fenêtre de sélection de machine de la figure (III.2) 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

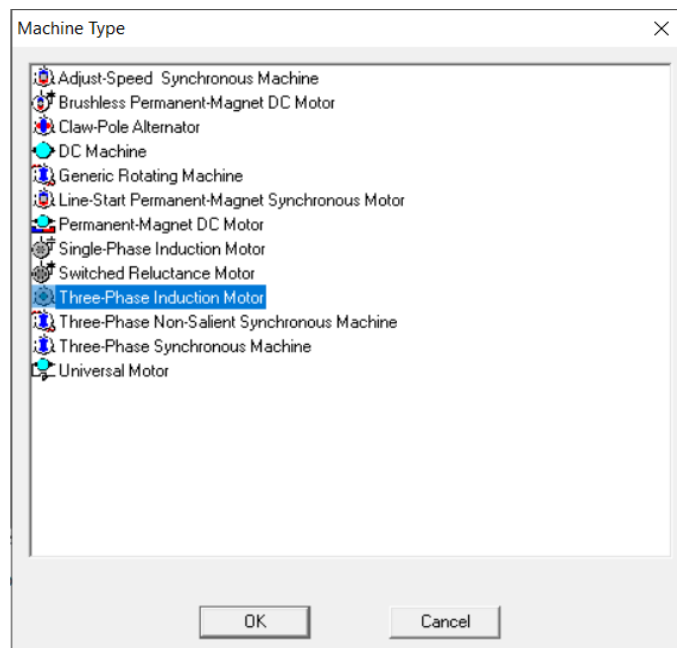


Figure III.2 : Interface de sélection du type de la machine

La fenêtre de projet de la figure (III.3) comprend une liste d'outils déroulante pour les différentes parties citées avant (stator, rotor, anneau ...), on fait ensuite entrer tous les paramètres de notre machine réelle :

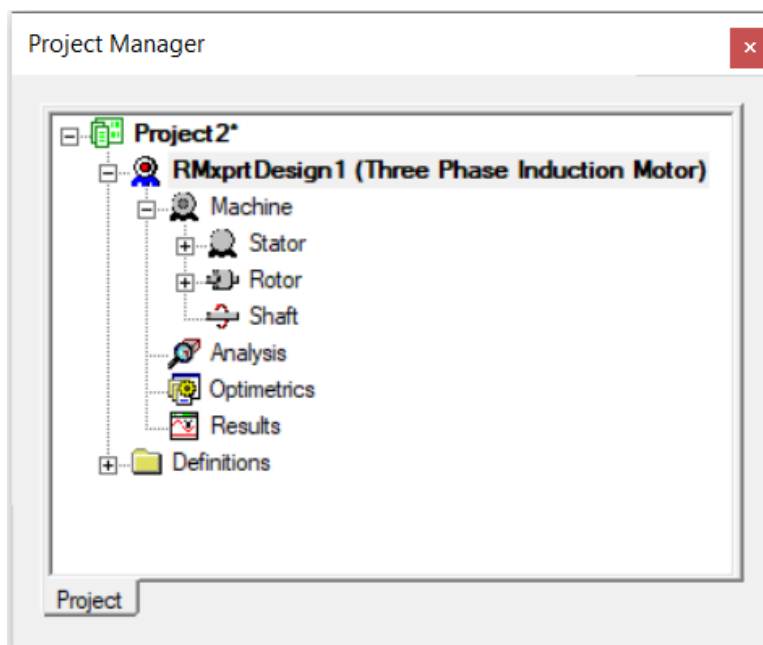


Figure III.3 : Fenêtre du gestionnaire de projet

III.5 Dimensions principales du stator

Le stator est un ensemble de couches avec des encoches où il y a des bobines, Les diamètres interne et externe ainsi que la longueur et le nombre d'encoche du stator se varient en fonction du type de moteur modélisé. Les principales dimensions de la machines données seront introduites dans le modèle RMxpert choisi.

La figure (III.4) montre les paramètres, dimensions principales du stator de la machine asynchrone avec le matériau magnétique.

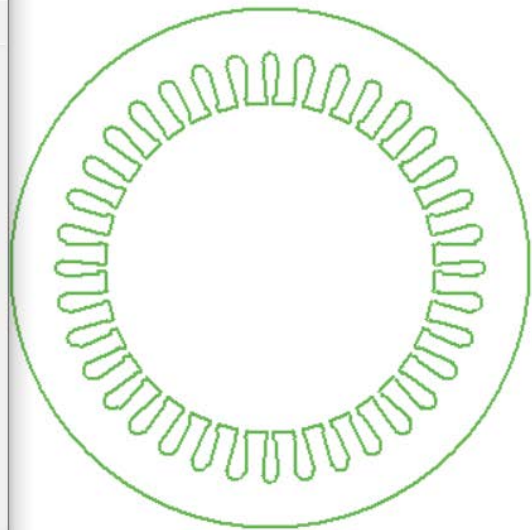
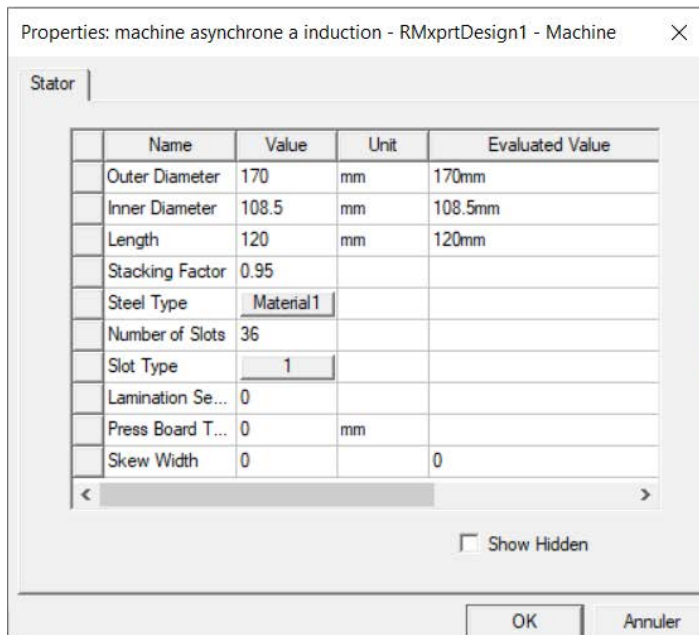


Figure III.4 : Dimensions principales du stator

III.5.1 Dimensions principales de l’encoche statorique

La figure (III.5) suivante représente la géométrie de l’encoche statorique de la machine asynchrone 4KW selon la géométrie donnée :

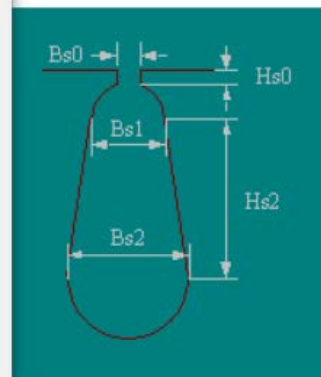
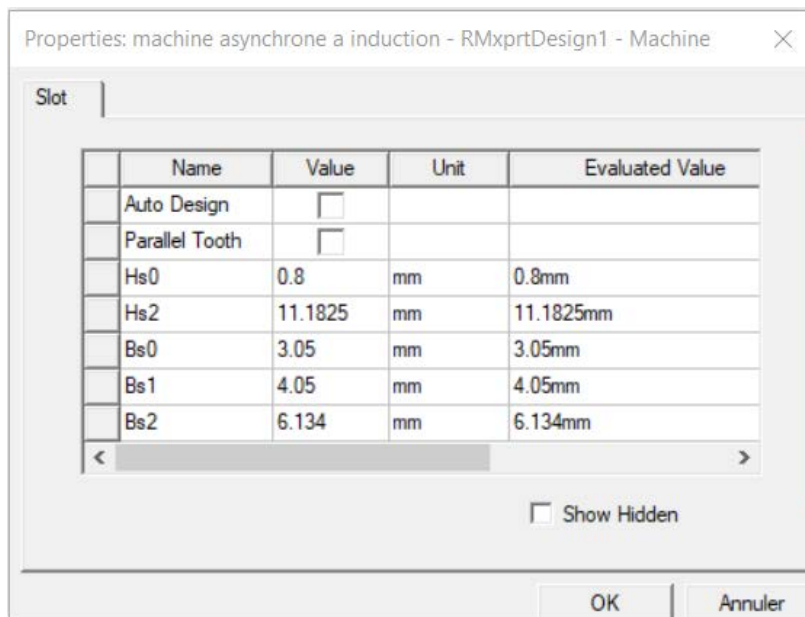


Figure III.5 : Dimension des encoches statorique

III.6 Dimensions principales du rotor

Le module RMxpprt offre l’avantage d’utiliser un rotor a cage avec de type d’encoches personnalisable qui répond parfaitement à nos besoins.

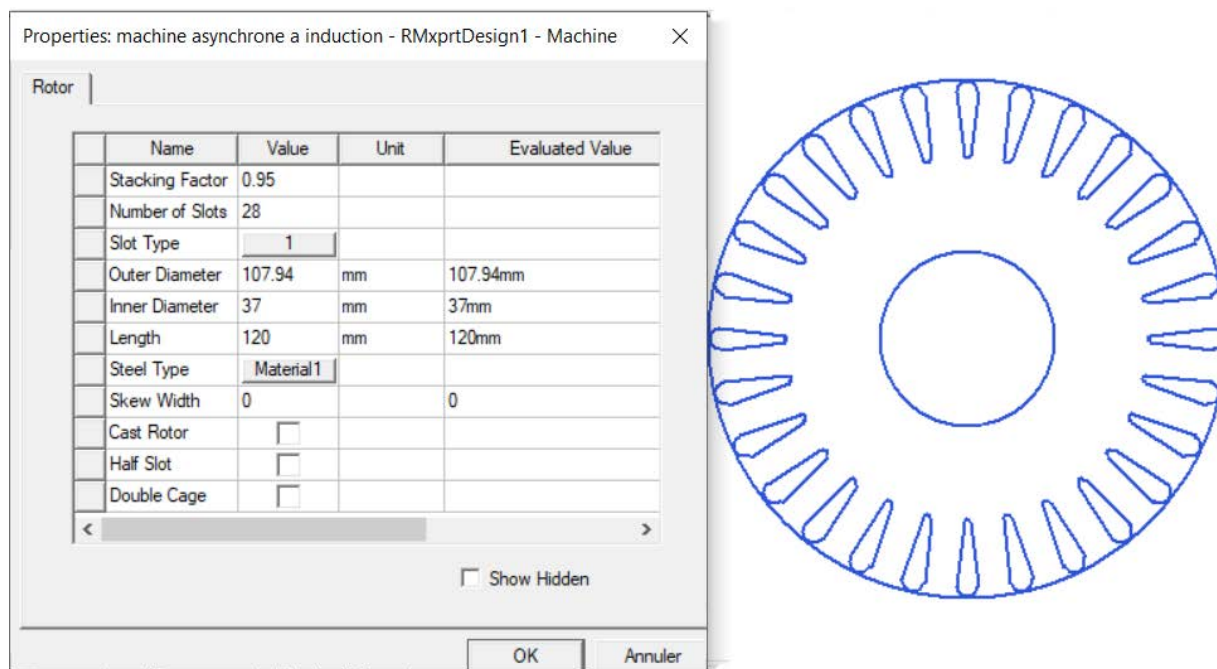


Figure III.6 : Dimensions principales du rotor

III.6.1 Dimensions de l'encoche rotorique

La figure (III.7) représente les modèles d'encoches prédéfinis par RMXprt pour créer les formes exactes des encoches.

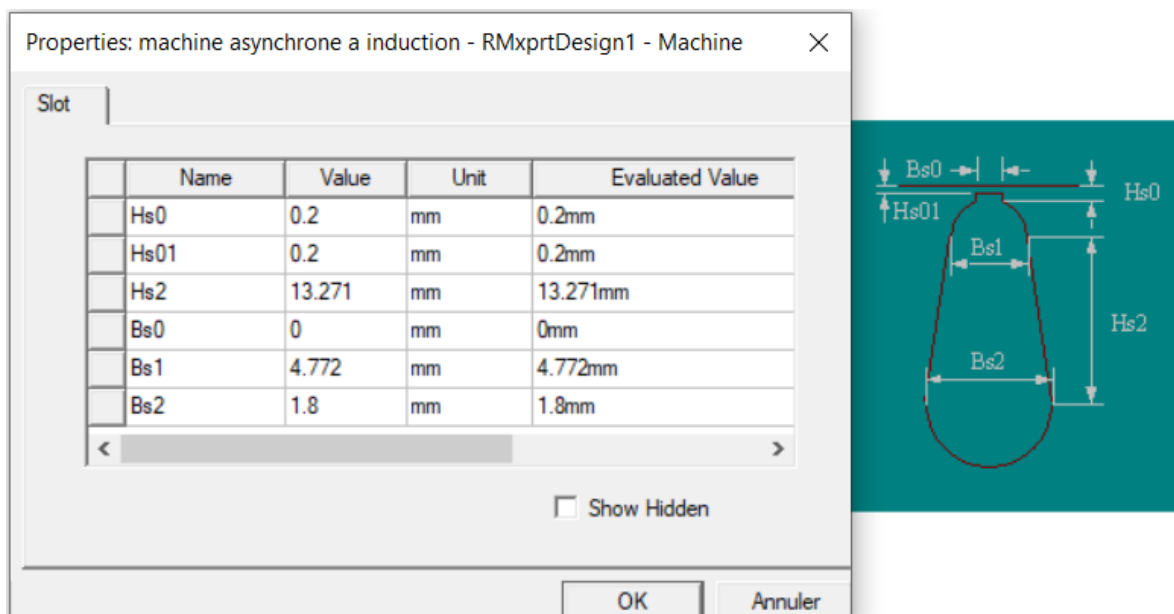


Figure III.7 : Forme d'encoche utilisée pour créer l'encoche rotorique

III.7 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 n'est pas préconfiguré dans le logiciel.

A cet effet nous avons introduit notre configuration du bobinage manuellement conformément à distribution donnée par constructeur.

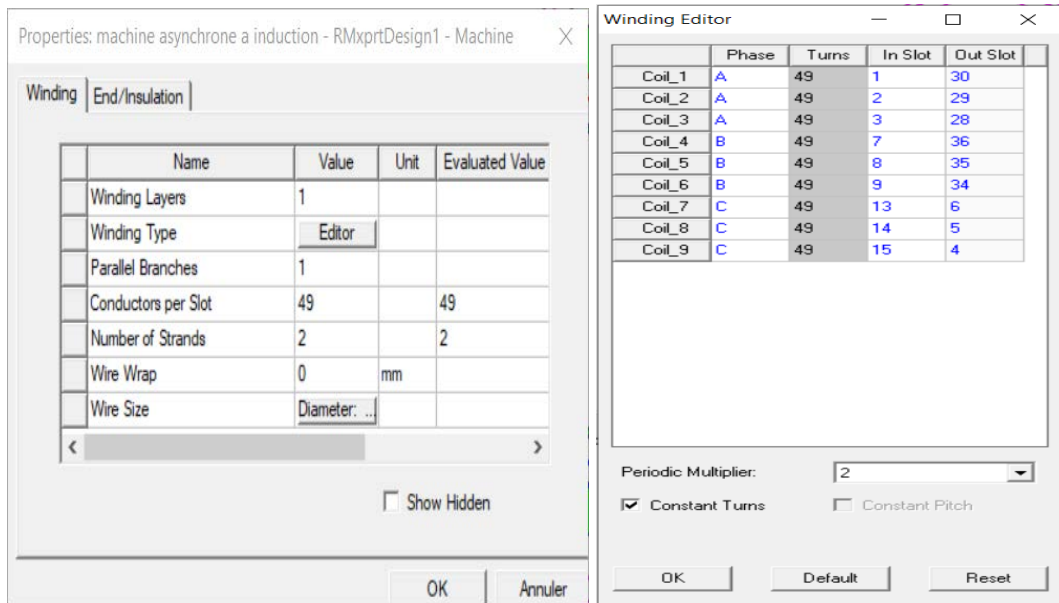


Figure III.8 : Paramètres de l'enroulement et du bobinage

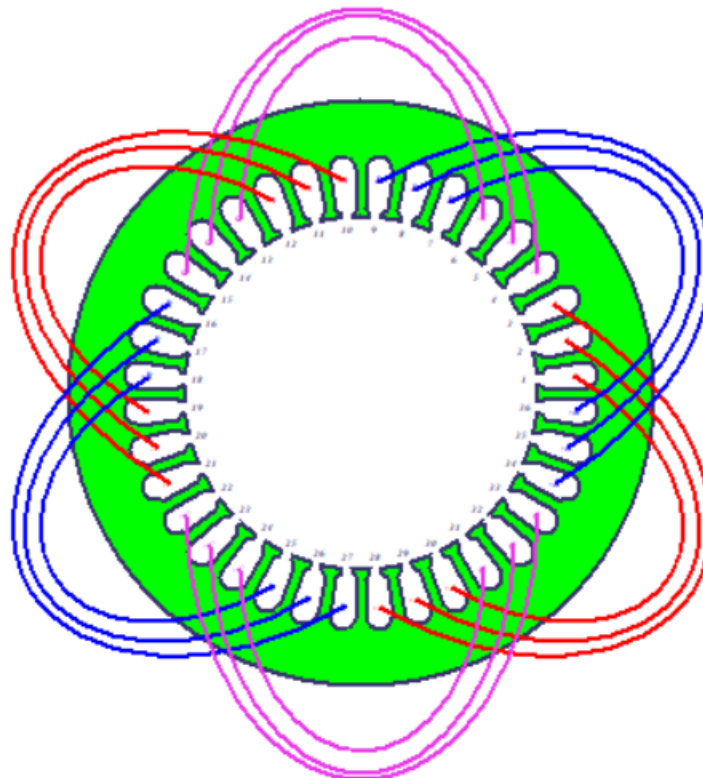


Figure III.9 : Distribution du bobinage statorique

III.8 Choix des matériaux

Le type de matériau (M800-50A) est un matériau ferromagnétique doux qui n'est pas inséré dans la bibliothèque des matériaux de RMXprt, on va l'ajouter manuellement, par un clic sur « steel type » la fenêtre suivante va s'ouvrir :

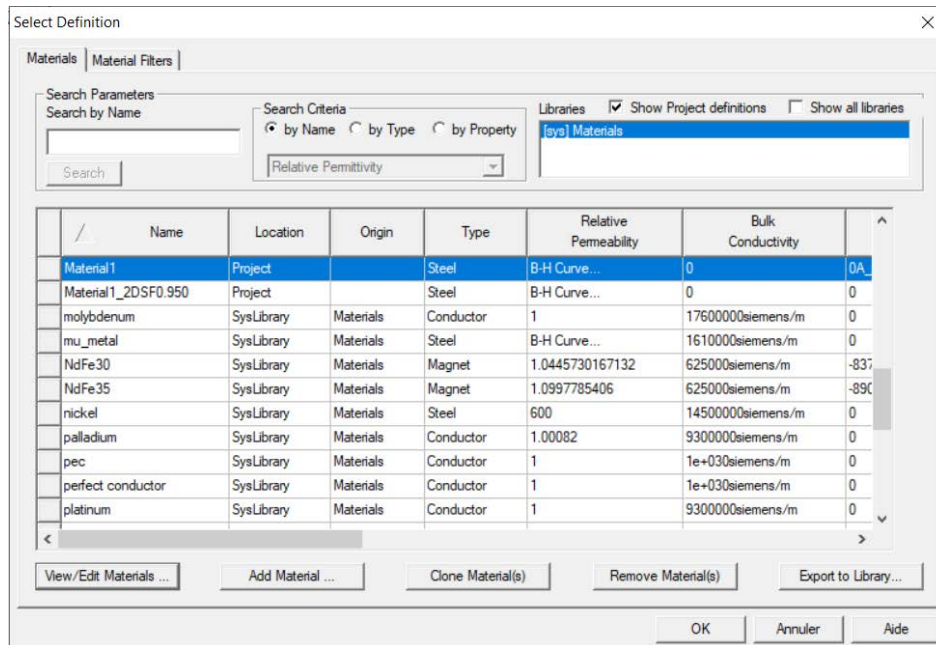


Figure III.10 : Type du matériau

On clique sur « add material » après on choisit type « nonliar », en suite on clique sur « BH Curve », on entre les coordonnées de B (tesla) et H (A/m) dans le tableau qui s'affiche, on aura la courbe par la quelle ce matériau est caractérisé comme le montre la figure suivante :

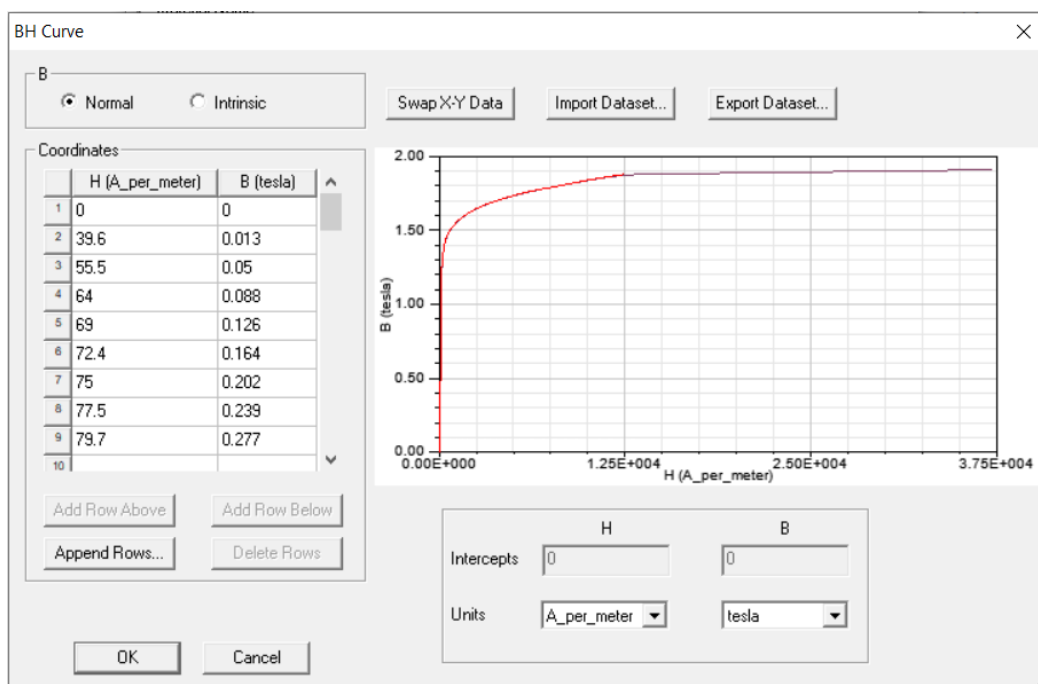


Figure III.11 : Caractéristiques B(H) du matériau utilisé dans le circuit magnétique

Une fois terminé on valide notre matériau pour le rotor et on refait la même chose pour le stator. Les figures (III.10) et (III.11) montrent le matériau utilisé dans la conception du modèle de la machine pour le rotor et le stator.

III.9 Validation et exportation du model vers Maxwell 2D

Afin de vérifier le comportement dynamique de la machine et voir les caractéristiques dynamiques, nous devons créer un modèle de simulation 2D permettant de calculer la distribution de l'induction magnétique à tout instant. Ce modèle est possible avec le module de résolution numérique de Maxwell2D.

Une fois la géométrie de la machine asynchrone est réalisée, Nous créons une solution transitoire et on lance la simulation pour une durée suffisante pour l'analyse spectrale.

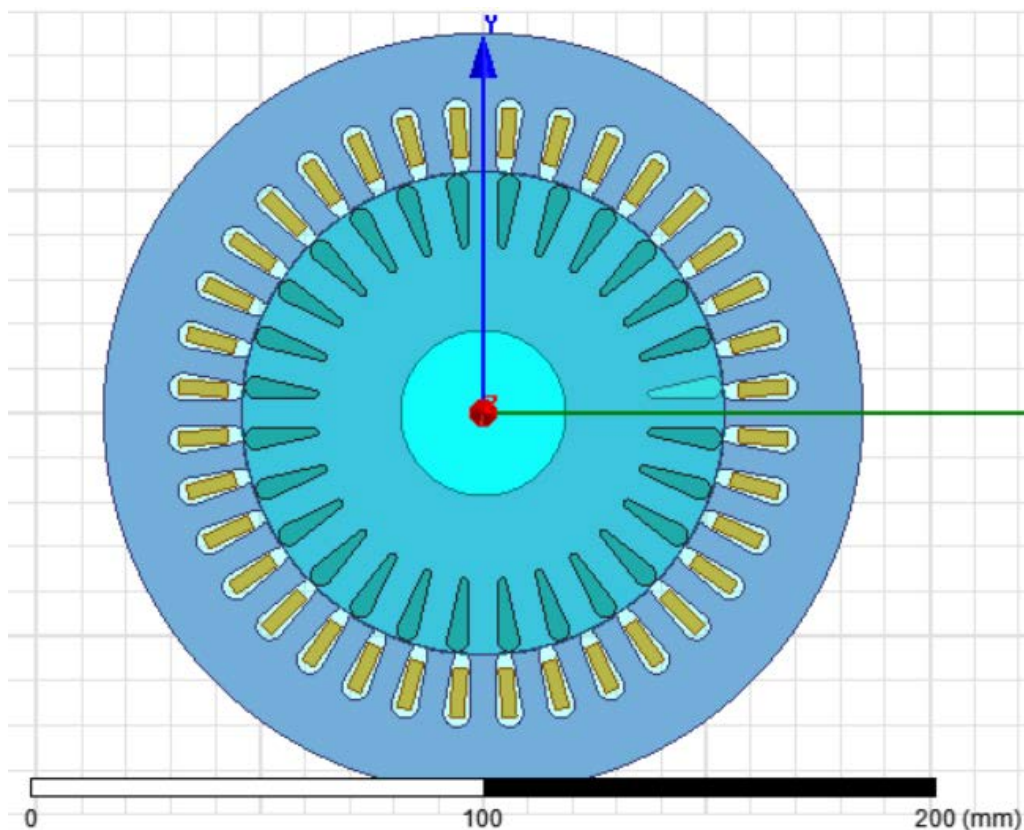


Figure III.12 : Le modèle 2D de la machine asynchrone

III.9.1 Validation du modèle 2D et exploitation des résultats

Selon les résultats escomptés et le temps de simulation dont on dispose, nous avons utilisé le mode de simulation magnétique transitoire qu'est le plus complet. Il traduit fidèlement la rotation du moteur et permet de retrouver les pulsations de flux générées par les barres cassées. Cependant, pour la machine étudiée, le maillage conséquent d'une part, le nombre de périodes et de pas de temps (surtout aux hautes fréquences), d'autre part, augmentent les temps

de calcul. Cependant, son utilisation est intéressante pour vérifier les résultats de calcul analytique.

III.9.2 Distribution de l'induction magnétique

Les figures (III.13) et (III.14) représentent respectivement la distribution de l'induction magnétique et la distribution des lignes du champ

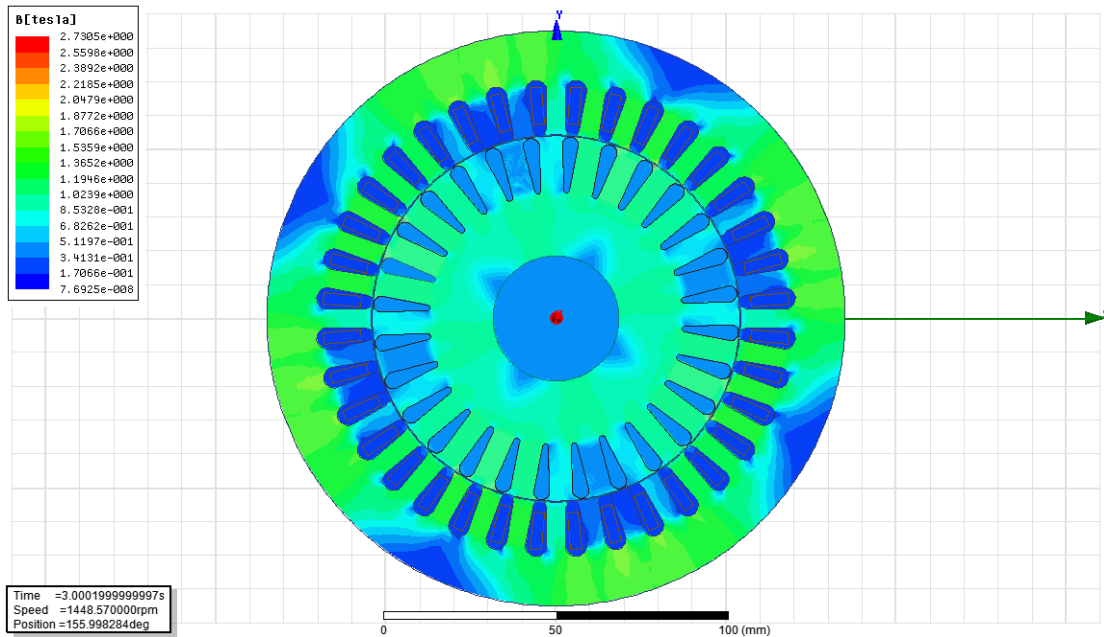


Figure III.13 : Distribution de l'induction magnétique

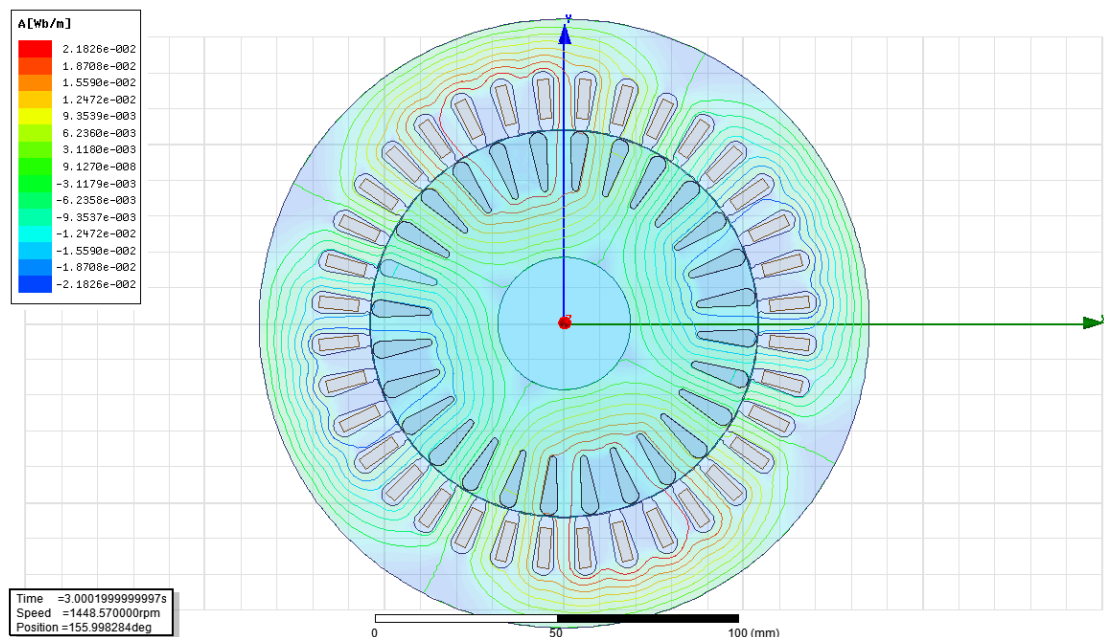


Figure III.14 : Distribution des lignes du champ

III.9.3 Exploitation des résultats de simulation

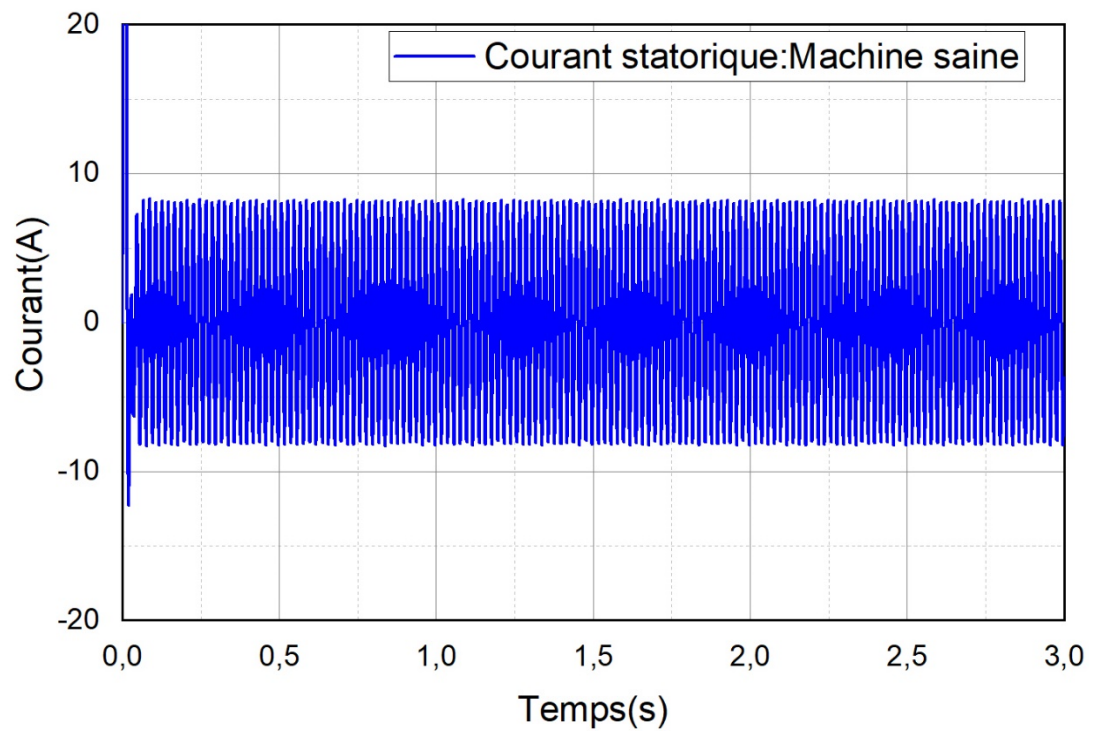


Figure III.15 : Courant statorique

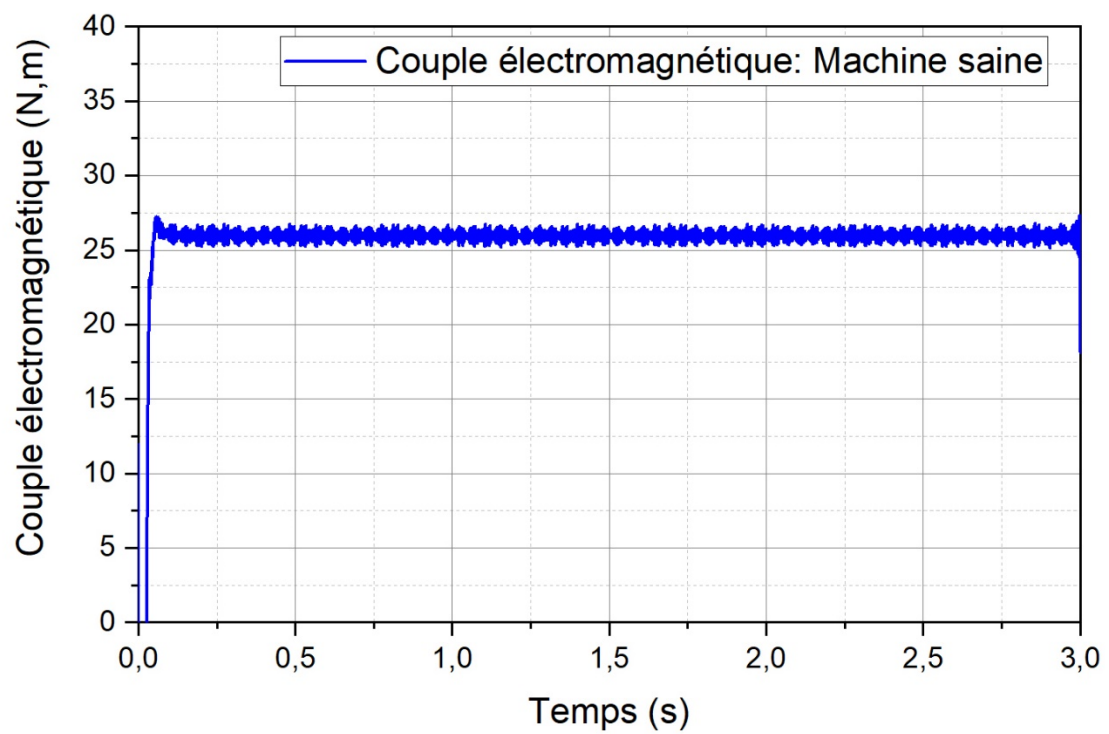


Figure III.16 : Couple électromagnétique

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré la capacité d'un logiciel de conception des machines électriques de calculer les paramètres réels de la machine que ne sont pas mesurables pour différents points de fonctionnement. La connaissance des paramètres de la machines aux différents régimes est nécessaire afin de permettre aux constructeurs tenir compte des différentes contraintes. Nous avons également présenté les caractéristiques dynamiques de la machine en utilisant l'outil de simulation 2D dédié pour ce faire. Les résultats obtenus ont montré une bonne concordance par rapport aux données du constructeur.

Chapitre IV

Détection des défauts rotoriques par l'analyse spectrale

IV.1. Introduction

Bien que la machine asynchrone soit réputée par ses qualités de robustesse et de faible coût de construction, il arrive néanmoins que celle-ci présente des pannes électriques ou mécaniques. Dans ce chapitre, on a développé une technique maintenant répandue qu'est l'analyse spectrale de la signature du courant statorique du moteur asynchrone à cage en vue de la détection d'un défaut au rotor, cassure de barres, en tenant compte des harmoniques d'espace.

Nous allons présenter les résultats de simulation effectués sur la machine avec et sans défauts de cassures de barres rotoriques, les résultats obtenus dans le cas de fonctionnement sain seront comparés à ceux avec défaut de barres.

IV.2. Simulation de la Machine Asynchrone en présence de défauts rotoriques

IV.2.1 Modélisation du défaut de rupture des barres

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale pour la mise au point d'une procédure de diagnostic, elles permettent la compréhension du fonctionnement sain et défectueux. Le type de défaut que nous étudions est la cassure de barres rotoriques de la machine asynchrone. La simulation de ce type de défaillance consiste à augmenter artificiellement la valeur de la résistance de barre incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible de zéro en régime permanent. Dans ce type de modélisation, une rupture de barre n'altère pas les inductances propres et mutuelles de la cage rotorique. Par conséquent, le programme de simulation s'adaptera à cette nouvelle contrainte et nous donnera l'évolution temporelle des différents signaux pour un fonctionnement de la machine avec ce type de défaut.

La cassure de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. La simulation que nous avons effectuée permet d'identifier les signatures de ce défaut et, de prévoir les détériorations générées dans le moteur.

Dans notre travail, nous avons utilisé une méthode de simulation de défauts qui consiste à affecter une résistivité très grande à la barre cassée afin d'annuler le courant circulant dans cette barre. Cette méthode permet également de modéliser une rupture partielle de la barre rotorique

car la barre cassée ne véhicule pas de courant, mais a un effet sur la répartition des lignes de champs. Nous allons donc étudier l'effet de défauts de ruptures des barres rotoriques sur l'évolution temporelle des différentes performances de la machine asynchrone. La figure suivante montre les barres en défaut :

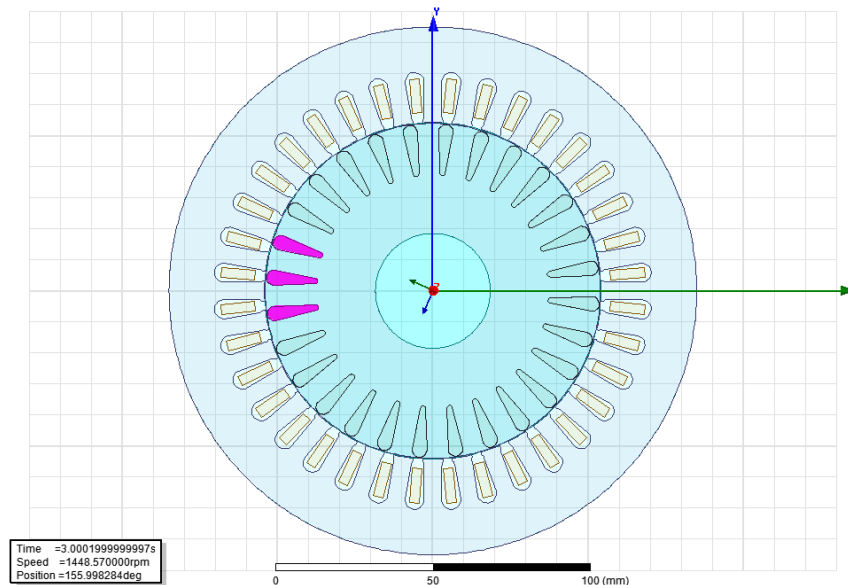


Figure IV.1 : Géométrie de la machine

L'objectif de cette modélisation est de mettre en évidence l'influence des défauts électriques sur les grandeurs temporelles de la machine asynchrone (courant, couple), les résultats obtenus dans le cas de fonctionnement sain seront comparés à ceux avec défaut de barres. Les simulations ont porté sur les cas de fonctionnements suivants :

- Fonctionnements d'une machine saine.
- Fonctionnements d'une machine avec une barre rotorique cassée.
- Fonctionnements d'une machine avec deux barres rotoriques cassées adjacentes.
- Fonctionnements d'une machine avec trois barres rotoriques cassées adjacentes.

IV.2.2 Analyse des résultats magnétiques

Les résultats de simulation obtenus (temps de simulation de 3s) montrant la distribution de l'induction magnétique et les lignes du champ dans les différentes géométries, sont présentés sur les figures IV.2, IV.3, IV.4 et IV.5.

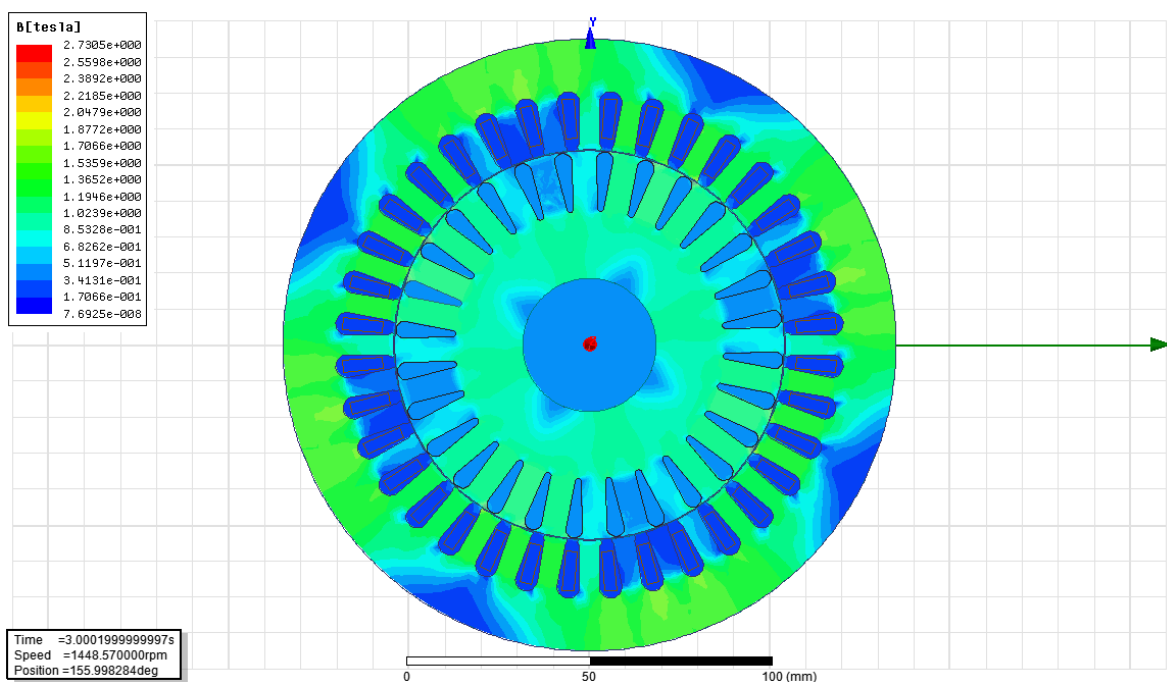


Figure IV.2 : Distribution de l'induction magnétique pour une Machine saine

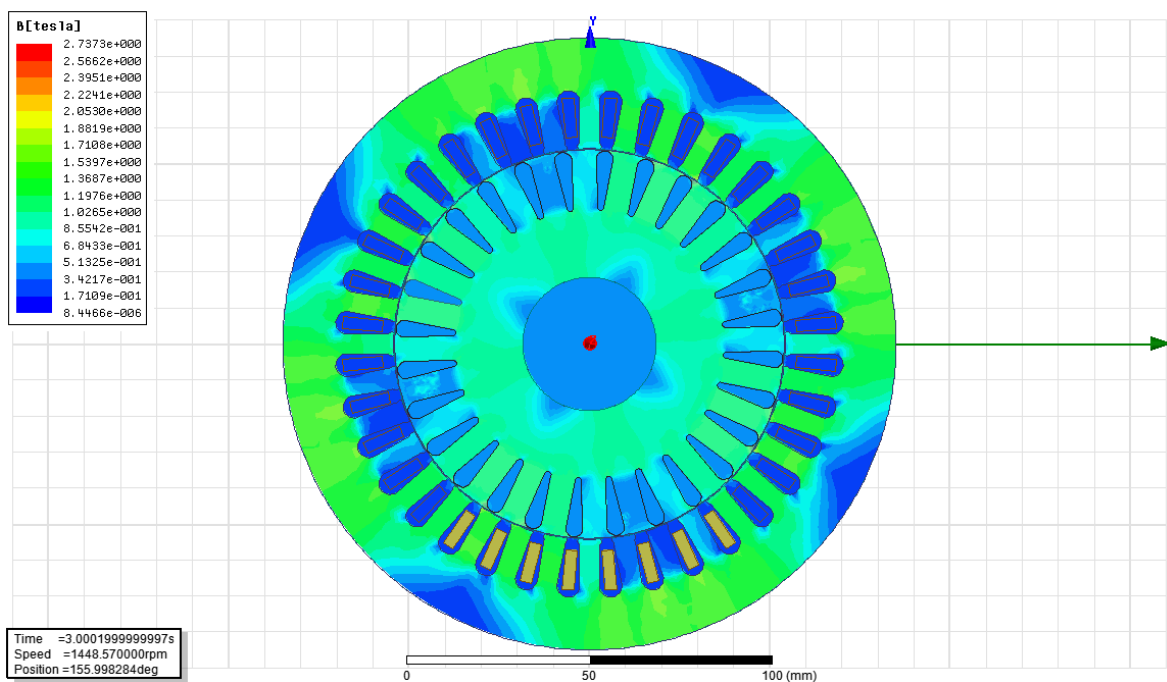


Figure IV.3 : Distribution de l'induction magnétique pour une Machine avec une barre cassée

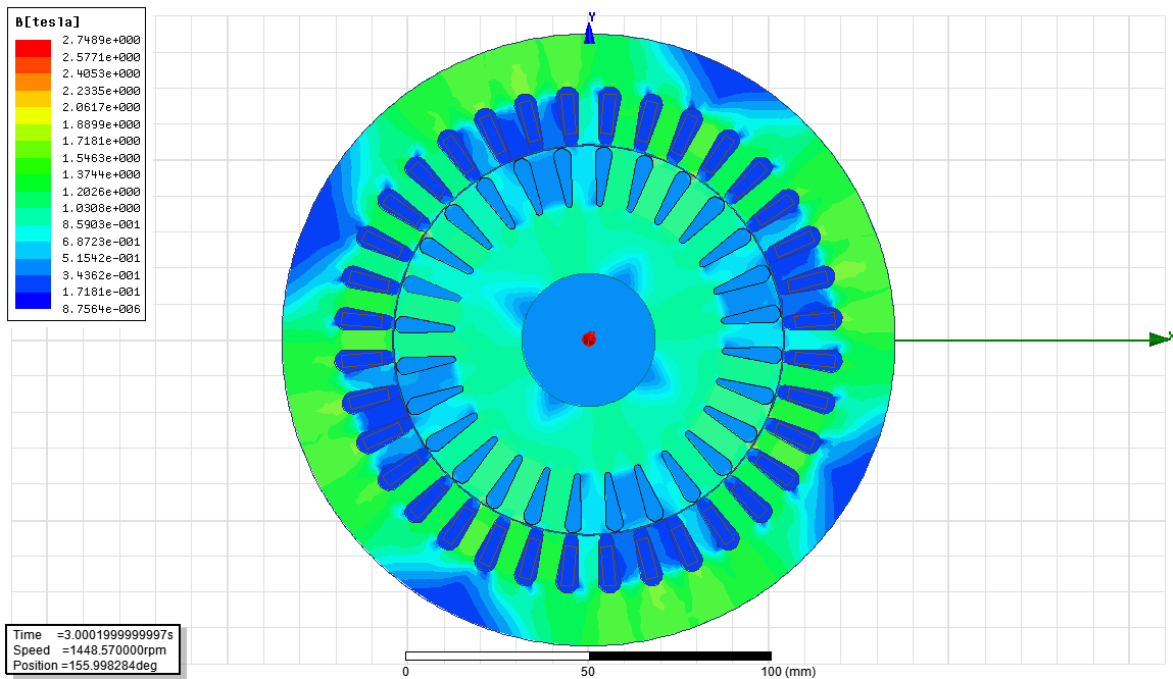


Figure IV.4 : Distribution de l'induction magnétique pour une machine avec deux barres cassées

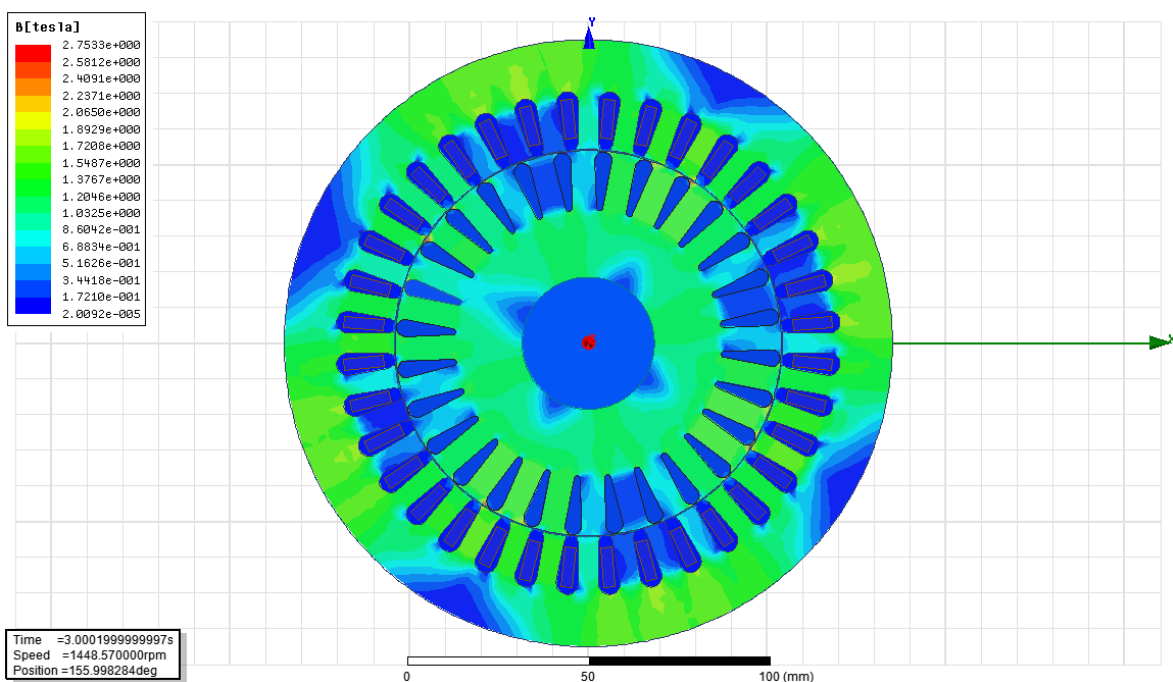


Figure IV.5 : Distribution de l'induction magnétique pour une Machine avec trois barres cassées

Les figures précédentes présentent respectivement la distribution magnétique pour la machine avec et sans défauts d'une ou plusieurs ruptures de barres rotoriques, on remarque que dans le cas sain la répartition du flux est homogène et symétrique de l'induction par contre dans les cas d'une rupture d'une barre ou plus, le flux présente une distorsion importante autour des barres cassées et le flux de la machine devient plus symétriques.

D'autre part les figures IV.6, IV.7, IV.8 et IV.9 montrent les lignes du champ magnétique pour les différents cas simulés.

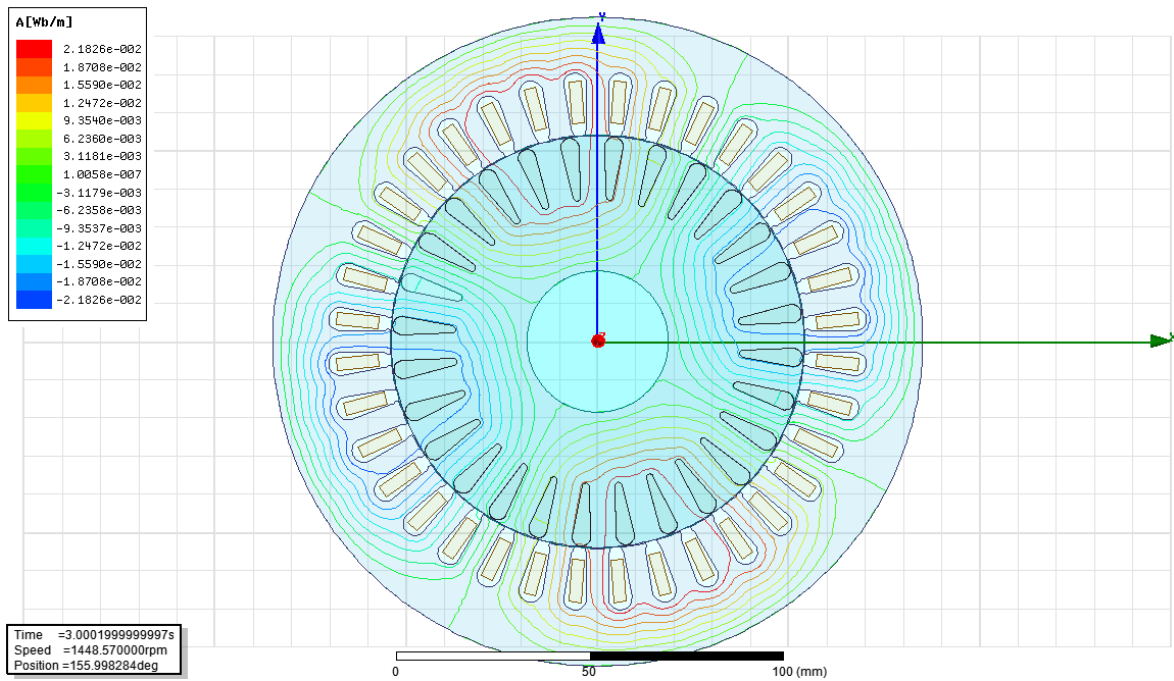


Figure IV.6 : Distribution des lignes du champ pour une machine saine

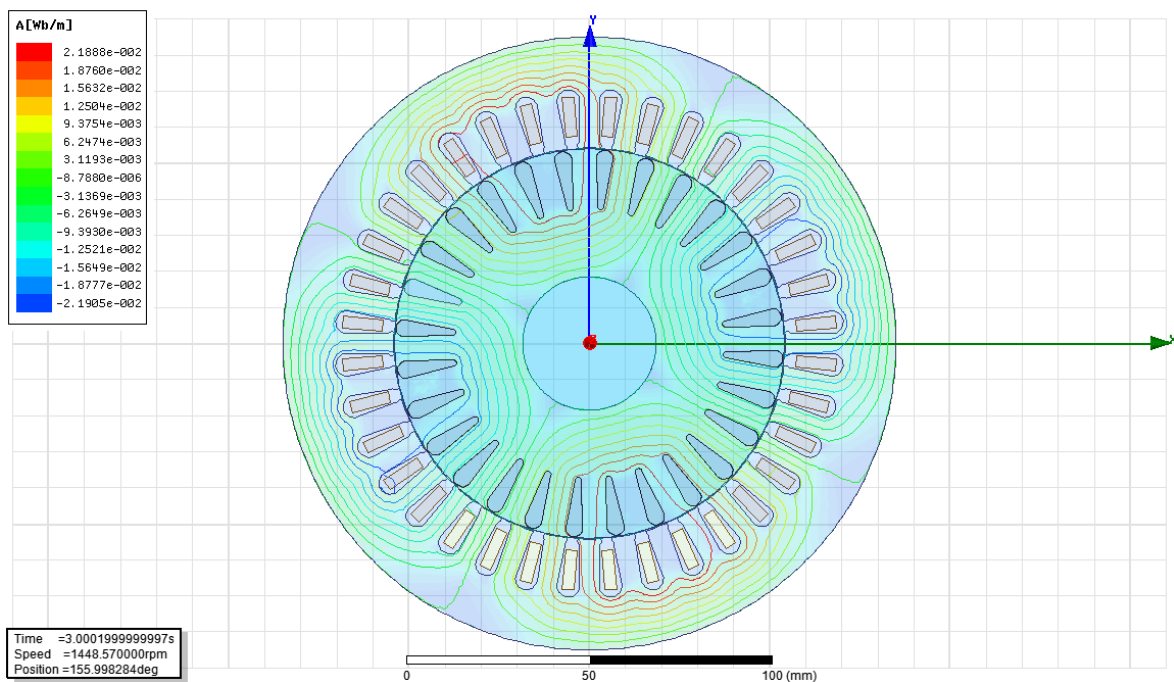


Figure IV.7 : Distribution des lignes du champ pour une machine avec une barre cassée

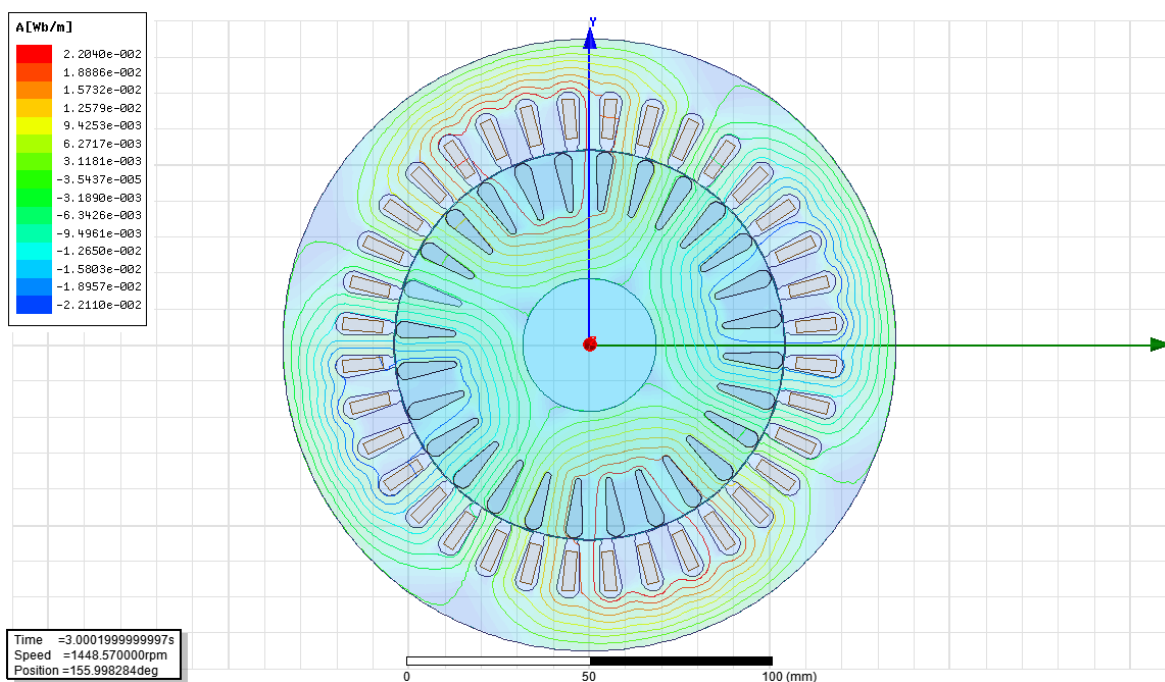


Figure IV.8 : Distribution des lignes du champ pour une machine avec deux barres cassées

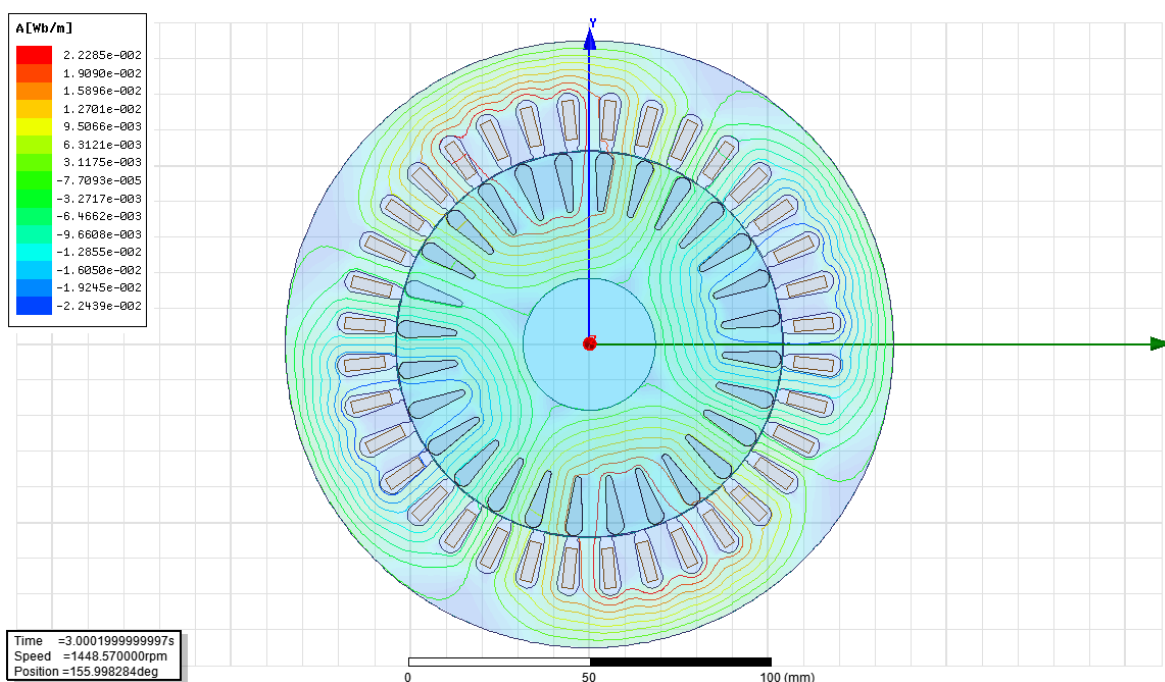


Figure IV.9 : Distribution des lignes du champ pour une machine avec trois barres cassées

Les figures précédentes présentent les lignes du champ pour la machine avec et sans défauts d'une ou plusieurs ruptures de barres rotoriques, on constate que la répartition du flux et la densité des lignes du champ dans le cas sain n'est pas la même dans le cas d'une rupture d'une barre ou plus ou la densité du flux diminue autour des barres cassées.

IV.2.3 Courants dans les phases statoriques

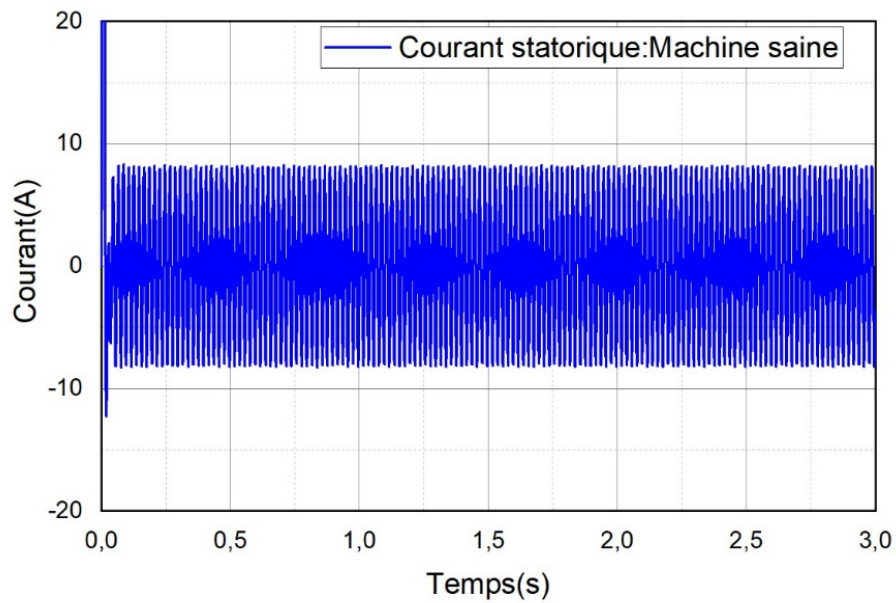


Figure IV.10 : Courant statorique pour une machine saine

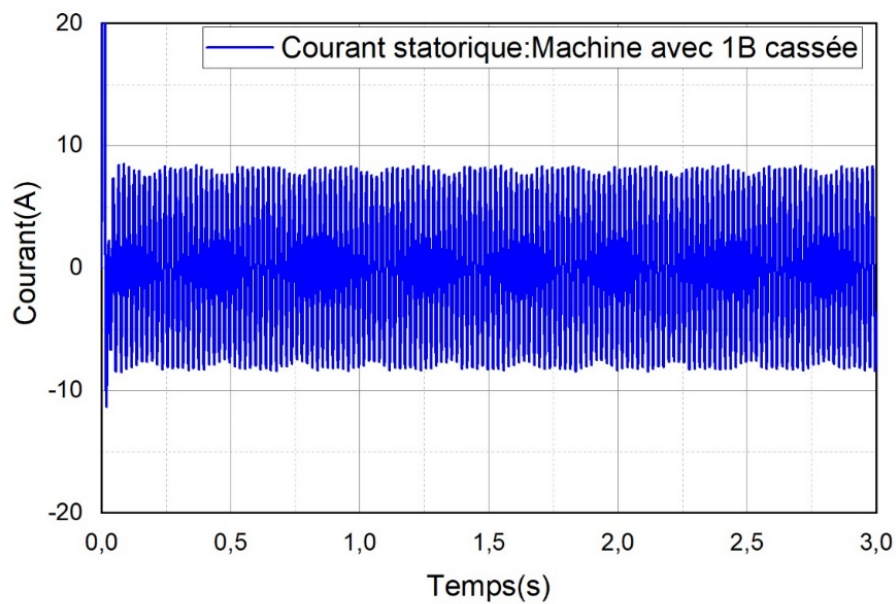


Figure IV.11 : Courant statorique pour une machine avec une barre cassée

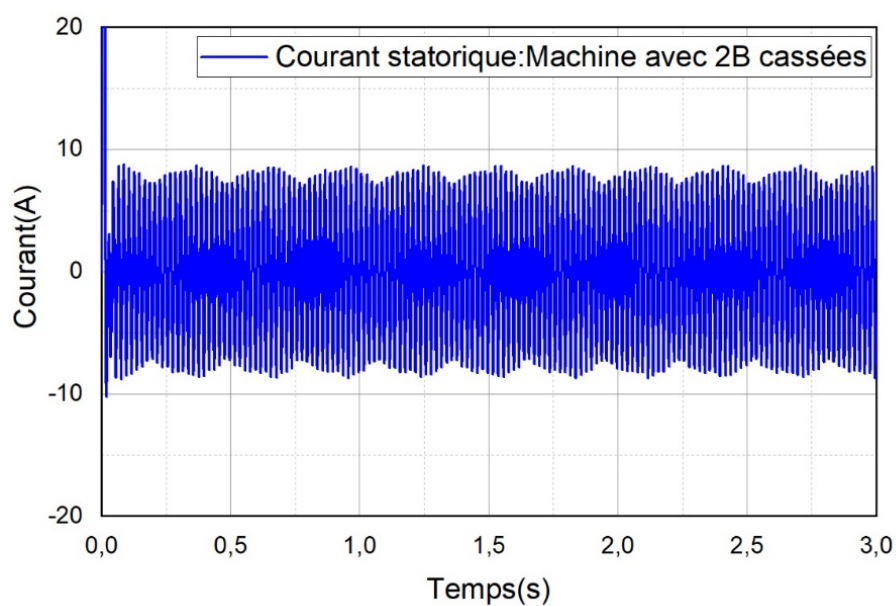


Figure IV.12 : Courant statorique pour une machine avec deux barres cassées

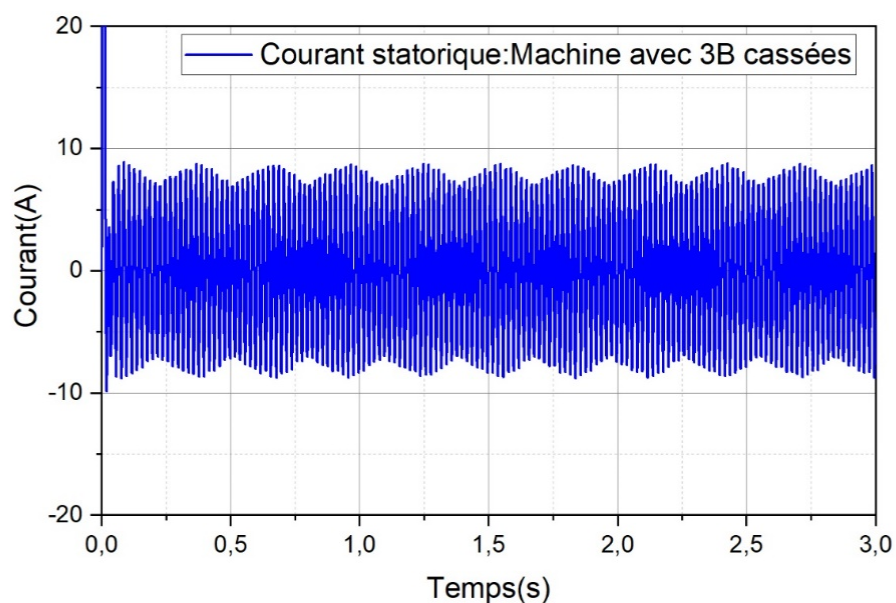


Figure IV.13 : Courant statorique pour une machine avec trois barres cassées

Nous pouvons constater que le défaut de rupture des barres rotoriques induit une modulation d'amplitude. Cette modulation devient visible lorsque le nombre des barres cassées augmente. Ce qui se traduit une élévation de température dans la machine.

IV.2.4 Le couple électromagnétique

L'analyse du couple électromagnétique peut donner également une image réelle sur le déséquilibre engendré dans la machine à cause de la rupture des barres rotoriques.

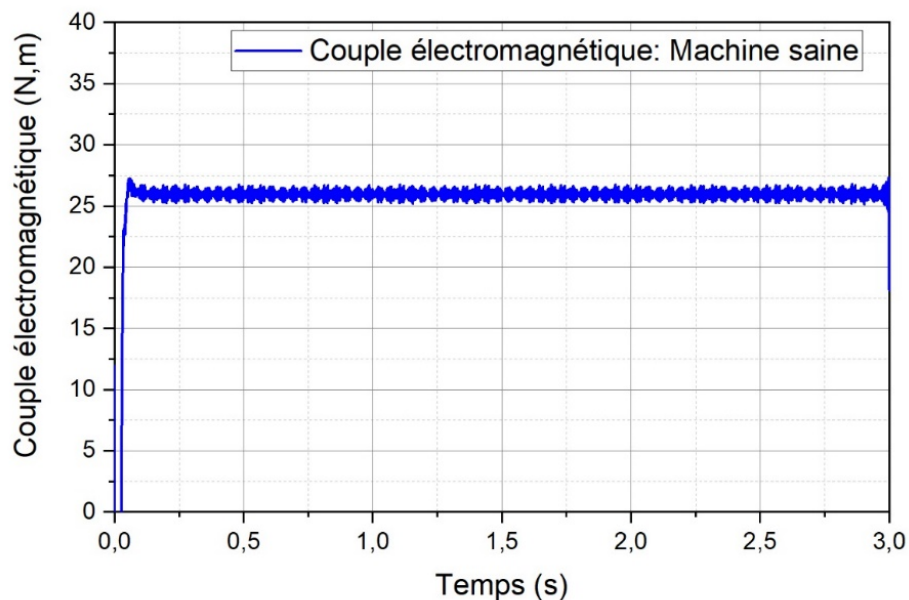


Figure IV.14 : Couple électromagnétique d'une machine saine

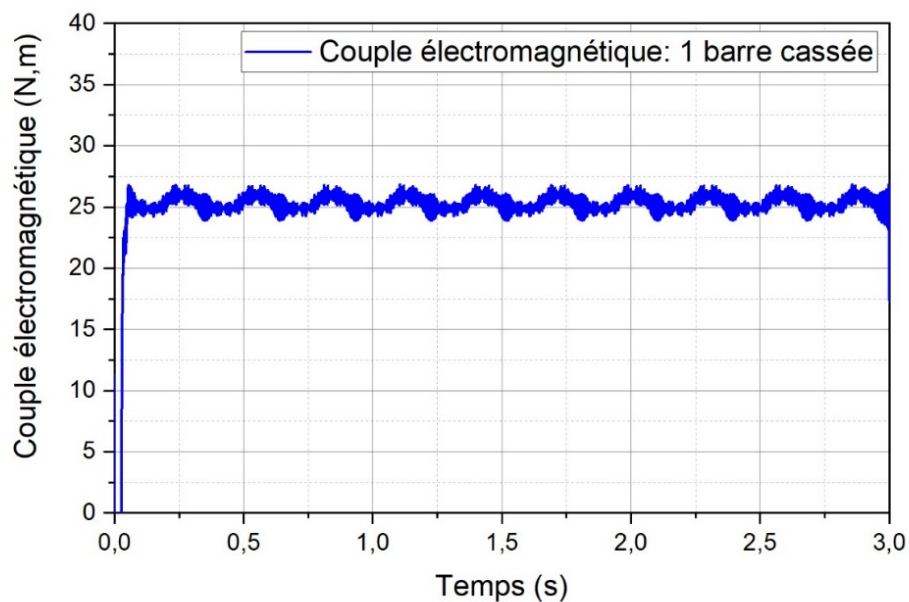


Figure IV.15 : Couple électromagnétique d'une machine avec une barre cassée

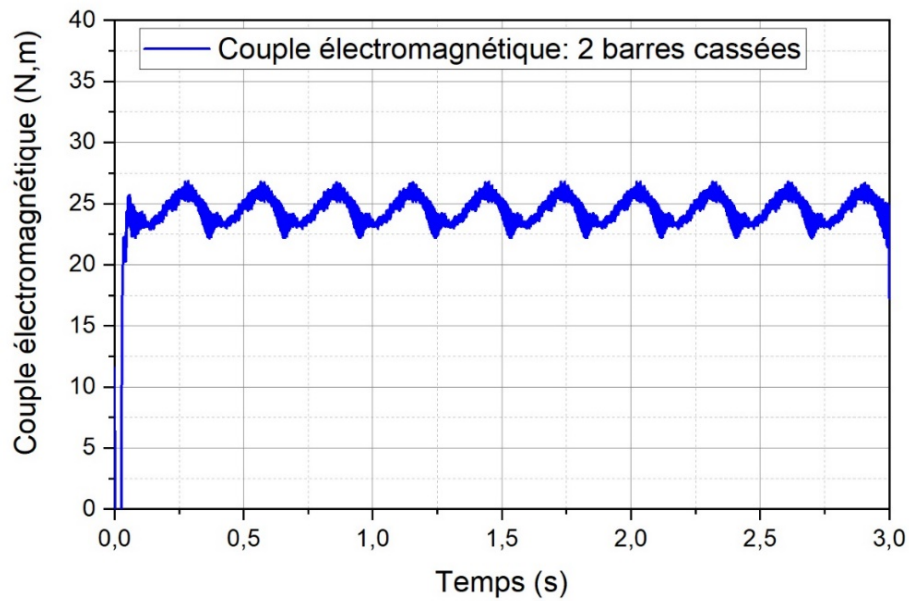


Figure IV.16 : Couple électromagnétique d'une machine avec deux barres cassées

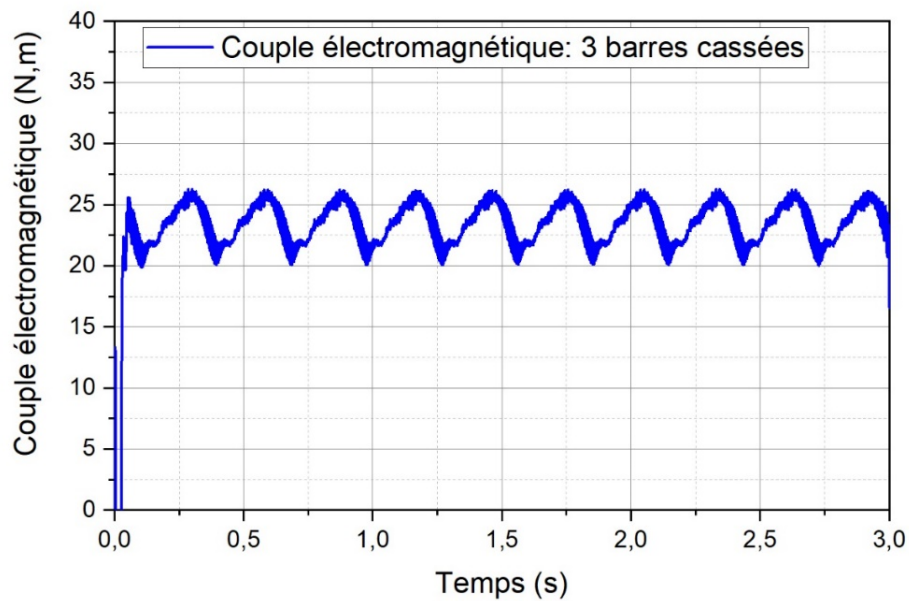


Figure IV.17 : Couple électromagnétique d'une machine avec trois barres cassées

L'allure des couples électromagnétiques montre clairement l'effet des cassures des barres. Des oscillations de fréquence $2kgf$ ont affecté le couple électromagnétique et cela sera traduit par des vibrations excessives dans la machine. Ce résultat montre aussi qu'il est possible de détecter la présence des barres cassées en analysant la signature du couple et les vibrations de la machine.

IV.3 Application de l'analyse spectrale au diagnostic de défauts des machines asynchrones

L'analyse spectrale du courant statorique est un outil d'analyse performant qui permet de mettre en évidence la présence des fréquences caractéristiques et notamment celles liées aux défauts. Le spectre de courant d'une phase ne permet pas d'avoir la composante inverse de courant, par contre l'analyse spectrale du vecteur d'espace des courants statoriques permet de séparer deux séquences de spectres : l'une directe définit dans la plage fréquentielle $(1+2kg)f$ l'autre inverse définit dans la plage fréquentielle $(1-2kg)f$

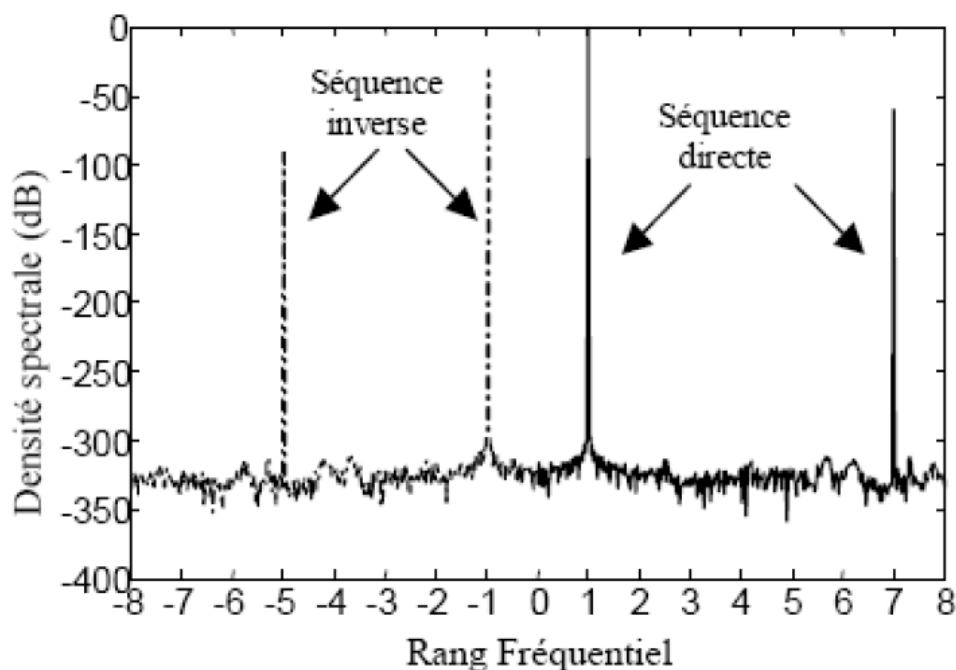


Figure IV.18 : Exemple de spectre des courants déséquilibrés.

IV.3.1 Application de l'analyse spectrale aux résultats de simulation

IV.3.1.1 Spectre des courants statoriques

Nous représentons dans la suite les spectres des courants statoriques pour les 4 machines en calculant la densité spectrale d'énergie DSP associée à chaque courant. La méthode de Welch a été utilisée pour afficher les résultats.

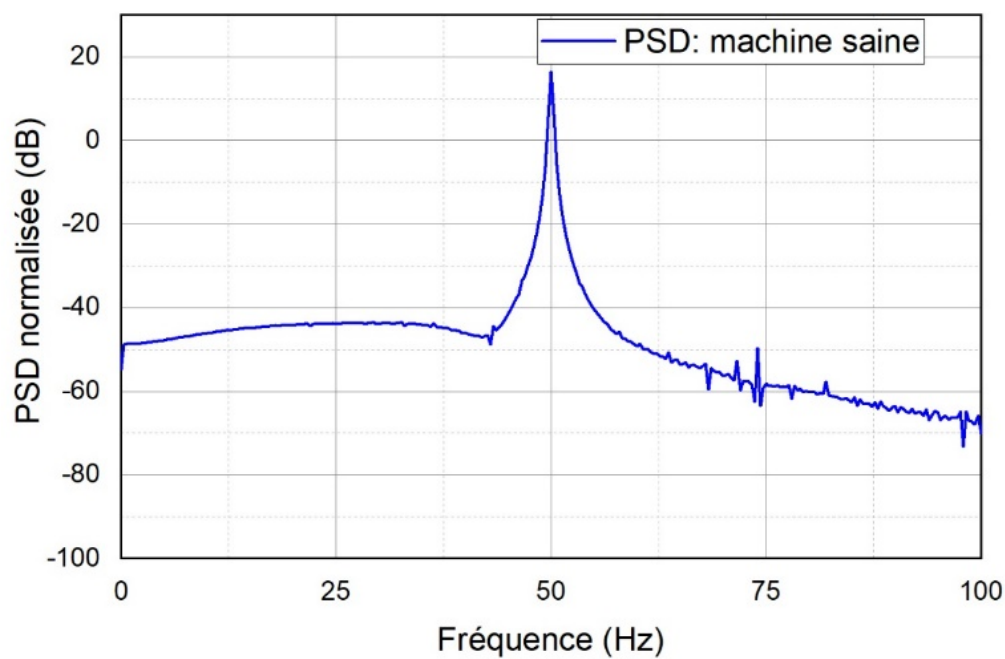


Figure IV.19 : Spectre du courant statorique d'une machine saine

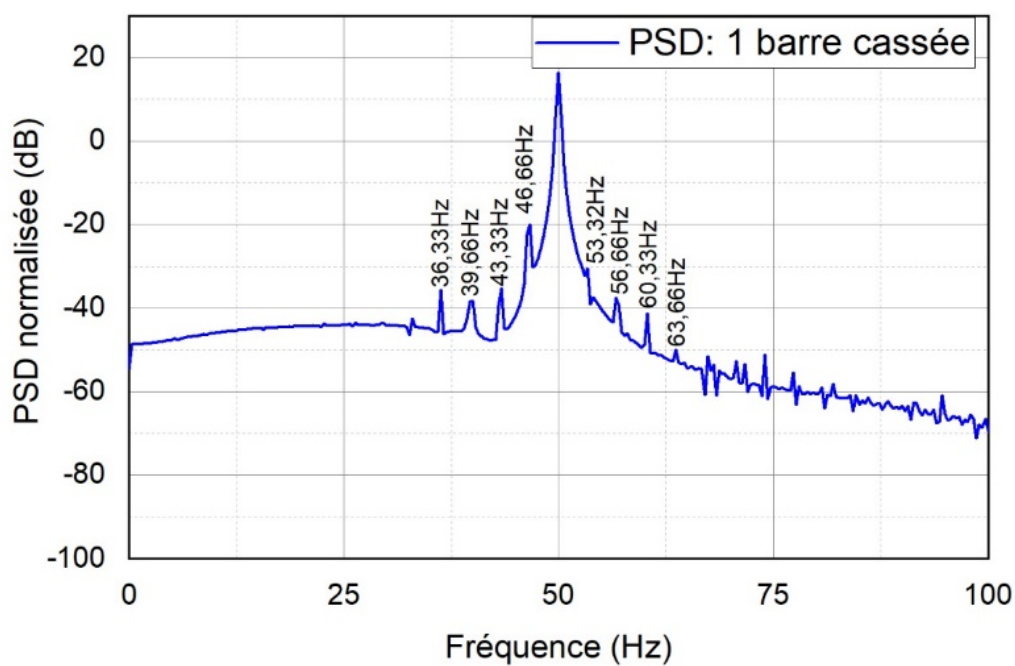


Figure IV.20 : Spectre du courant statorique d'une machine avec une barre cassée

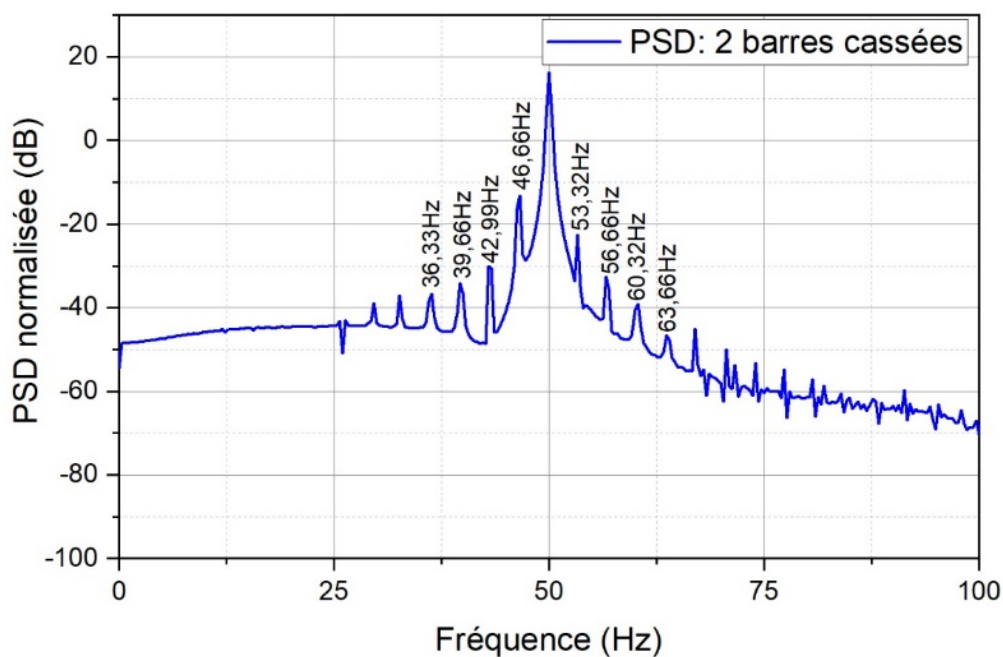


Figure IV.21 : Spectre du courant statorique d'une machine avec deux barres cassées

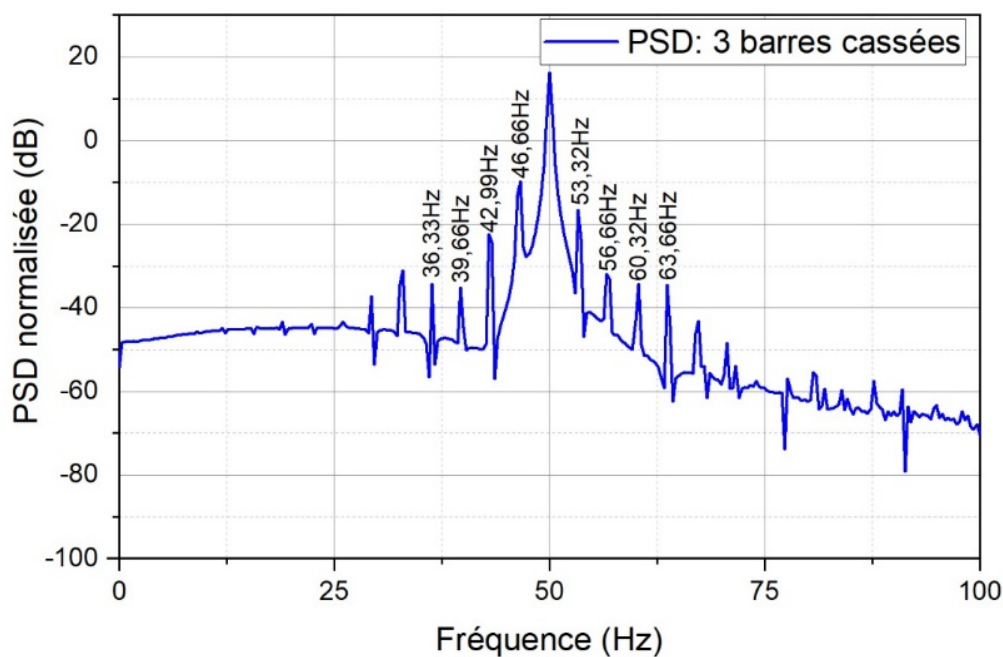


Figure IV.22 : Spectre du courant statorique d'une machine avec trois barres cassées

Le calcul de la densité spectrale de puissance (PSD) des courants statoriques indique clairement l'existence des défauts dans les machines défectueuses, les amplitudes de fréquences $(1+2k)f$ et $(1-2k)f$ nous a donné une information sur la défaillance au niveau du rotor.

Le tableau IV.1 Et les figures IV.23 et IV.24 Montrent l'augmentation progressive des amplitudes $(1+2kg)f$ et $(1-2kg)f$ en dB pour les différentes machines.

Le rang	Machine avec une barre cassée		Machine avec deux barres cassées		Machine avec trois barres cassées	
	$(1-2kg)f$	$(1+2kg)f$	$(1-2kg)f$	$(1+2kg)f$	$(1-2kg)f$	$(1+2kg)f$
K=1	46.66 Hz	53.32 Hz	46.66 Hz	53.32 Hz	44.33 Hz	53.32 Hz
	-19.97 dB	-30.63 dB	-13.27 dB	-22.63 dB	-9.75 dB	-16.57 dB
K=2	43.33 Hz	56.66 Hz	42.99 Hz	56.66 Hz	42.99 Hz	56.66 Hz
	-35.37 dB	-37.51 dB	-30.03 dB	-32.61 dB	-22.36 dB	-31.92 dB
K=3	39.66 Hz	60.33 Hz	39.66 Hz	60.32 Hz	39.66 Hz	60.32 Hz
	-38.34 dB	-41.29 dB	-34.21 dB	-39.13 dB	-35.11 dB	-34.36 dB
K=4	36.33 Hz	63.66 Hz	36.33 Hz	63.66 Hz	36.33 Hz	63.66 Hz
	-35.73 dB	-49.93 dB	-36.68 dB	-46.59 dB	-34.32 dB	-34.43 dB

Tableau IV.1 : Variation d'amplitude en dB des harmoniques de défauts

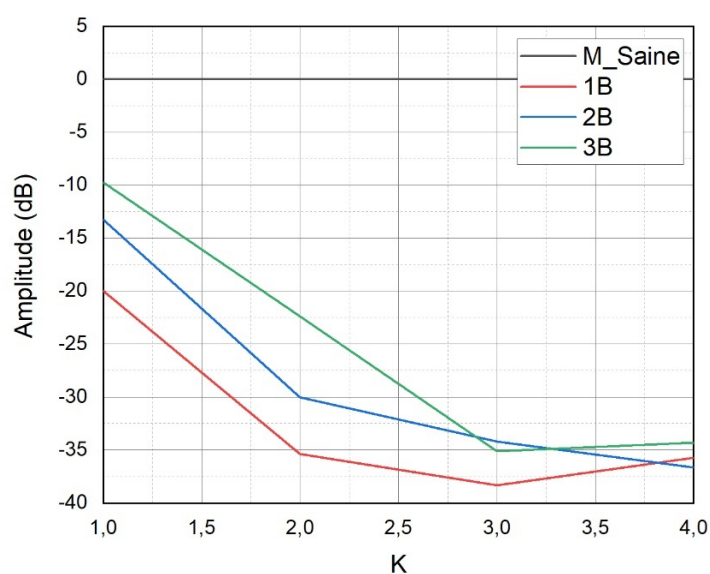


Figure IV.23 : l'évolution des harmoniques $(1-2kg)f$ dans les différentes machines

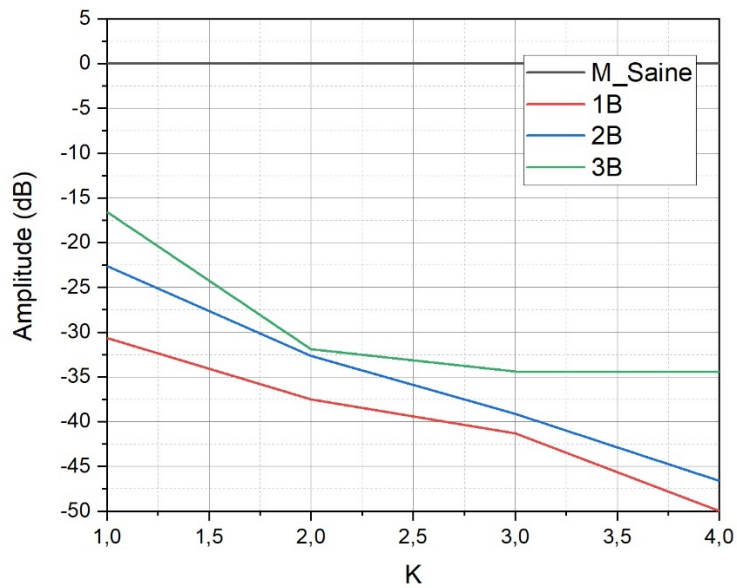


Figure IV.24 : l'évolution des harmoniques $(1+2kg)f$ dans les différentes machines

IV.3.1.2 Spectre de Couple électromagnétique

La caractéristique du couple électromagnétique est considérée comme l'image directe des courants statorique et par conséquent elle peut être utilisée pour détecter la présence de toutes dissymétries dans le rotor. Les fréquences $2kgf$ peuvent être facilement identifiées sur le spectre du couple. Les figures IV.25 à IV.28 montrent les spectres les différentes machines.

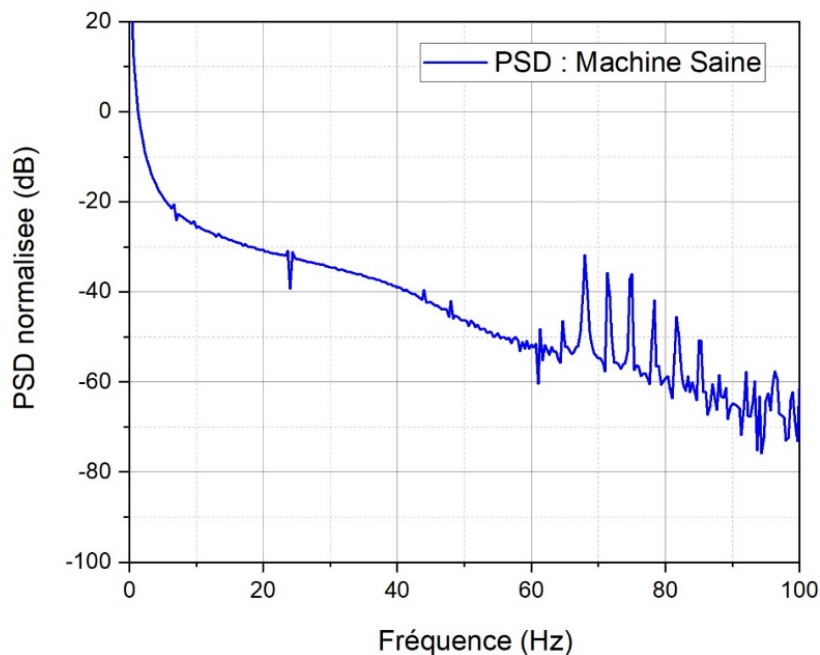


Figure IV.25 : Spectre du couple électromagnétique d'une machine saine

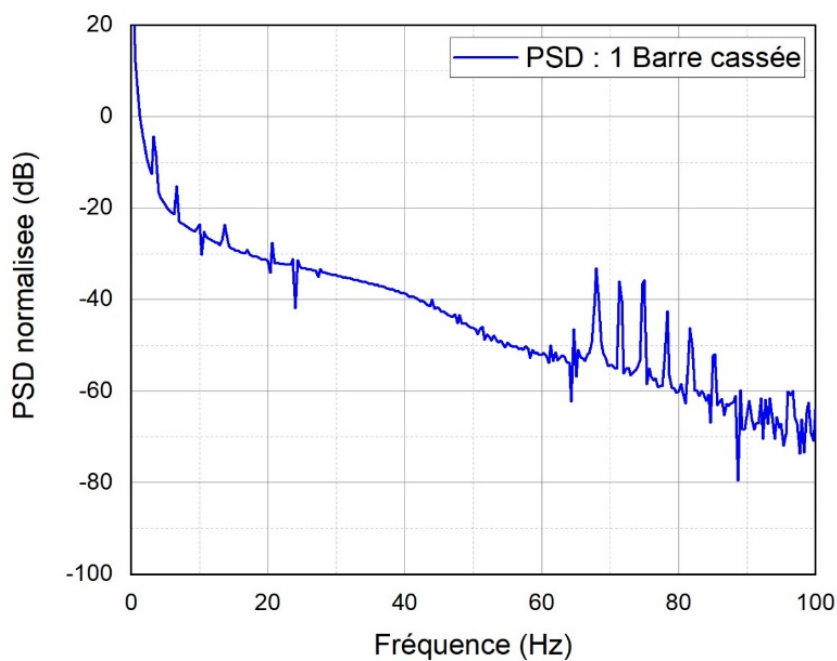


Figure IV.26 : Spectre du couple électromagnétique d'une machine avec une barre cassée

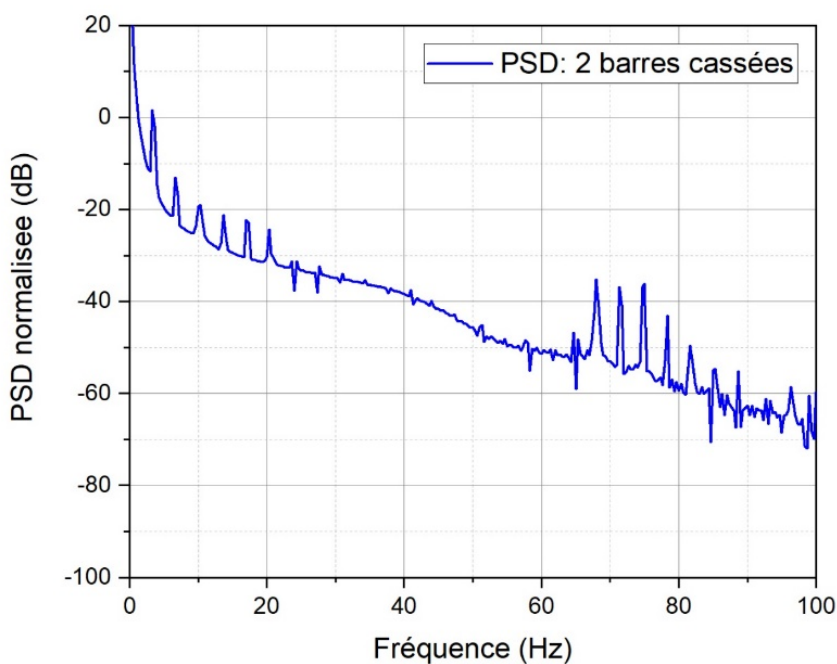


Figure IV.27 : Spectre du couple électromagnétique d'une machine avec deux barres cassées

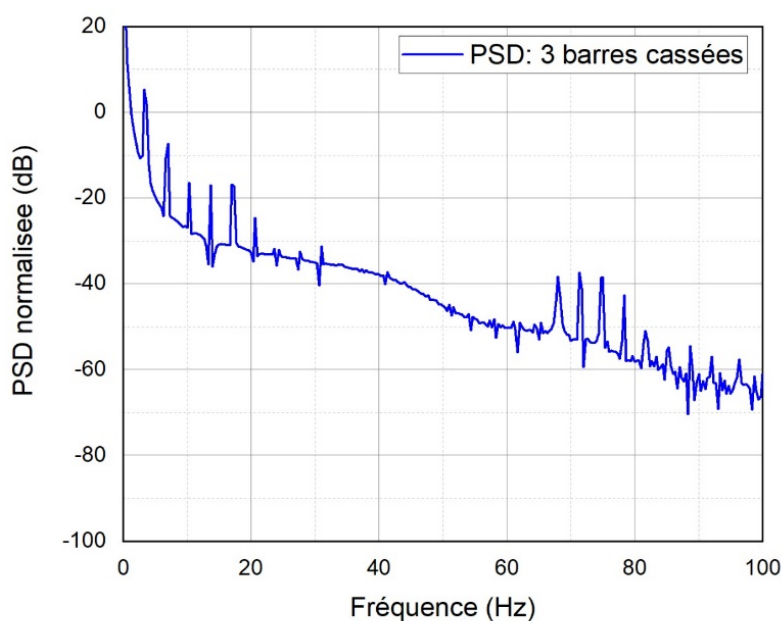


Figure IV.28 : Spectre du couple électromagnétique d'une machine avec trois barres cassées

Dans le cas d'une rupture d'une barre ou une rupture partielle, il est difficile de voir cette modulation d'amplitude sur les courants ou sur le couple. Donc il est nécessaire de passer à l'analyse spectrale afin de chercher les harmoniques inducteurs des défauts. Pour ce faire nous avons calculé la densité spectrale d'énergie associée à chaque signal. Nous avons remarqué une apparition des harmoniques autour du fondamentale avec une amplitude proportionnelle au degré du défaut.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentées le résultat de simulation des défauts rotoriques et nous avons montrées les caractéristiques mesurables (courant et couple) de la machine qui peuvent être utilisé pour l'analyse spectrale. Une inspection visuelle des allures des courant et du couple montre une présence d'une modulation d'amplitude ($2kgf$) augmente avec le degré du défaut.

Dans ce travail, on a présenté l'effet de cassure des barres rotoriques avec une prise en compte des harmoniques d'espace, et ainsi identifié les signatures les plus significatives sur le spectre du courant statorique à partir des résultats obtenus par la simulation. Les cassures de barres engendrent :

- Des oscillations sur le couple et la vitesse.
- L'apparition d'harmoniques sur les courants statoriques.

L'analyse spectrale du courant statorique nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la rupture des barres de la cage rotorique. Il s'est avéré que la surveillance de l'amplitude des composantes de fréquence, présente dans le spectre fréquentiel du courant statorique, permet de détecter la présence d'un défaut au niveau de la cage rotorique de la machine par la présence des harmoniques de fréquences $(1 \pm 2g)f$. L'analyse de l'amplitude des harmoniques d'espace dans le spectre du courant statorique donne des informations supplémentaires non négligeables pour le diagnostic des défauts rotoriques.

Conclusion Générale et Perspectives

Les travaux menés au cours de ce mémoire s'inscrivent dans le cadre de la contribution dans le domaine de la modélisation et diagnostic des machines électriques asynchrones triphasées en utilisant un logiciel CAO appelé Maxwell 2D basé sur la méthode des éléments finis.

Nous avons conçu un modèle de simulation en 2D à partir des données réelles de la machine. Ce modèle représente une machine virtuelle qui peut reproduire les comportements dynamiques de la machine pour un fonctionnement saine et dégradé sous la présence des barres cassées.

La validation du modèle sur une machine de 4kW a montré la capacité du logiciel de reproduire les mêmes caractéristiques dynamiques. La dégradation des performances de la machine a été clairement montré sur les allures des courants et du couples en présence des défauts rotoriques.

L'analyse spectrale des signatures du courants et des couples a montré également la possibilité de détecter ce type de défauts en analysant ces grandeurs mesurables à partir de l'alimentation de la machine et sans faire des vérifications périodiques de l'état de la machine. La présence des harmoniques supplémentaires dans les caractéristiques dynamiques sous l'effet des cassures de barres peut être exploité pour installer un système de diagnostic et surveillance en temps réel permettant de détecter et localiser un éventuel défaut.

Suite aux résultats de calculs et de simulation, nous pouvons dire que la méthode choisie pour la détection des défauts rotoriques par l'analyse spectrale est efficace, précise et simple. Elle est basée sur la connaissance préalable de plusieurs données nécessaires pour l'étude.

Bibliographie

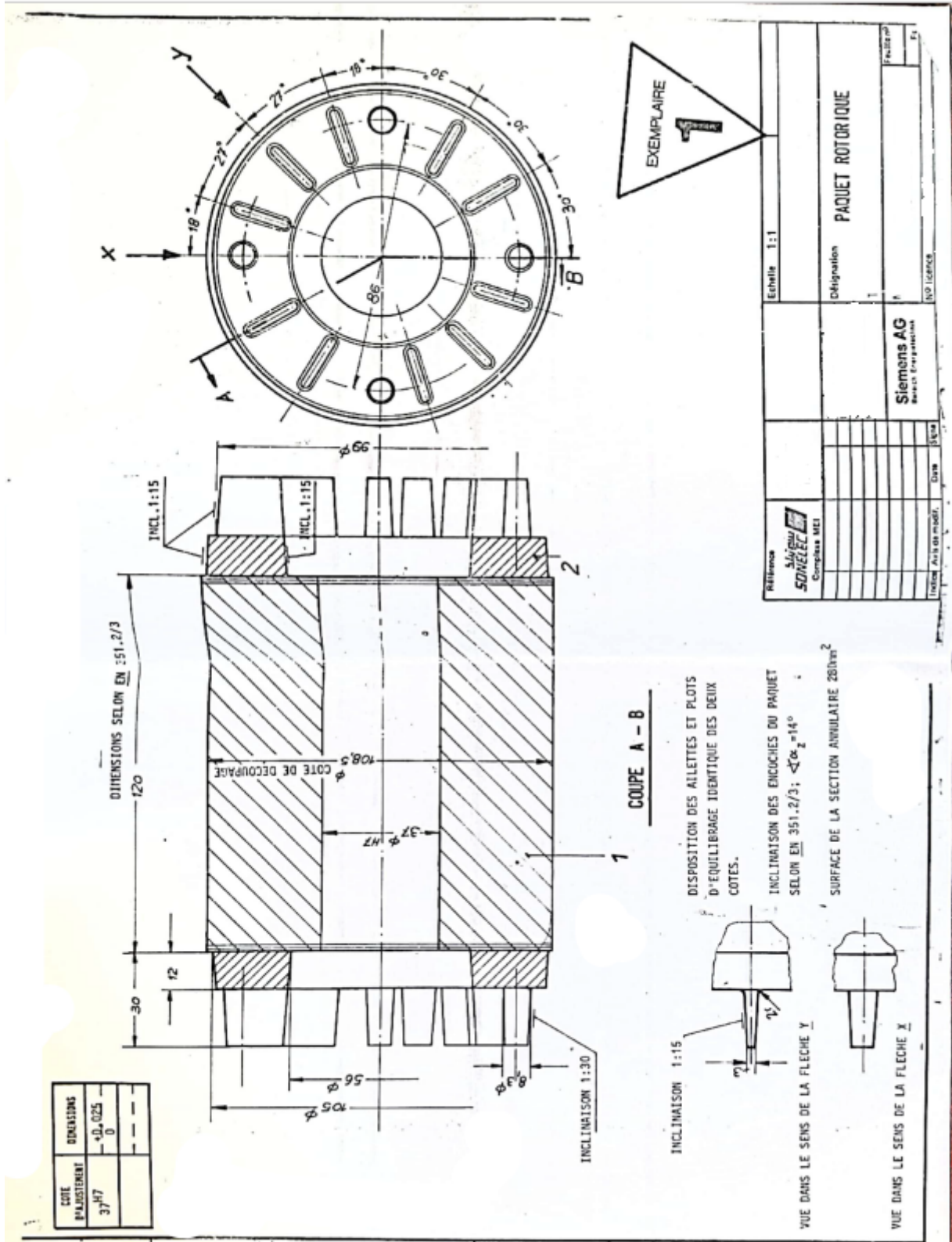
- [1] S. Bennedjai, « Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction », Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2016.
 - [2] A. Bouzida, « Diagnostic de Défauts des Machines Asynchrones par la Technique du Traitement du Signal », Thèse Doctorat, École Nationale Polytechnique, 2015.
 - [3] S. Kerfali, « Contribution à la surveillance et au diagnostic des défauts de la machine asynchrone », Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2016.
 - [4] A. Ceban, « Méthode Globale de Diagnostic des machines électriques », Thèse de doctorat, 2012.
 - [5] D. Thailly, « Etude du champ de dispersion des machines à courant alternatif : Application au diagnostic » Thèse de doctorat, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE), Université d'Artois, Béthune, France, 2007.
 - [6] N. Leboeuf, « Contribution à l'étude des machines synchrones à aimants permanents en présence de défauts inter-spires : modélisation, détection de défauts inter-spires ». Université de Lorraine, 2012.
 - [7] J. A. Farooq, « Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents » Université de Technologie de Belfort-Monbéliard, 2008.
 - [8] A. H. Bonnett, C. Yung, « Increased efficiency versus increased reliability IEEE », 2008.
 - [9] M. Khov, « Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents : Détection des courts-circuits par suivi paramétrique », Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009.
 - [10] R. Romary « Diagnostic de machines électriques par analyse du champ magnétique de dispersion : Nouvelles tendances en conception de machines électriques », Rev. L'électricité et l'électronique REE, 2006.
 - [11] S. Bazi, « Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2016.
 - [12] B. Trajin, « Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones », Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009.
 - [13] A. Ibrahim, « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée » Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences, ingénierie, santé, Université Jean Monnet, France, 2009.
 - [14] R. Hubert, « Le Contenu Spectral Du Courant Absorbé Par La Machine Asynchrone En Cas de Défaillance, un Etat de l'art », Faculté des Sciences, Nancy, CEDEX, 2002.
 - [15] G. Didier, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2004.
 - [16] [16] Mohamed EL Kamel OUMAAMAR, « Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée », Université de Lorraine, 2012
 - [17] G. Blanchet and M. Charbit, « Signaux et images sous Matlab », Hermes Science publications, 2001.
 - [18] P. M. Djuric and S. M. Kay, Digital signal Processing Handbook – Spectrum Estimation and modelling. CRC Press LLC, 1996.
 - [19] Ansoft Links, Maxwell, RMxprt and Simplorer are trademarks of ANSYS, Inc. All other trademarks are property of their respective owners. © 2010 ANSYS, Inc.
-

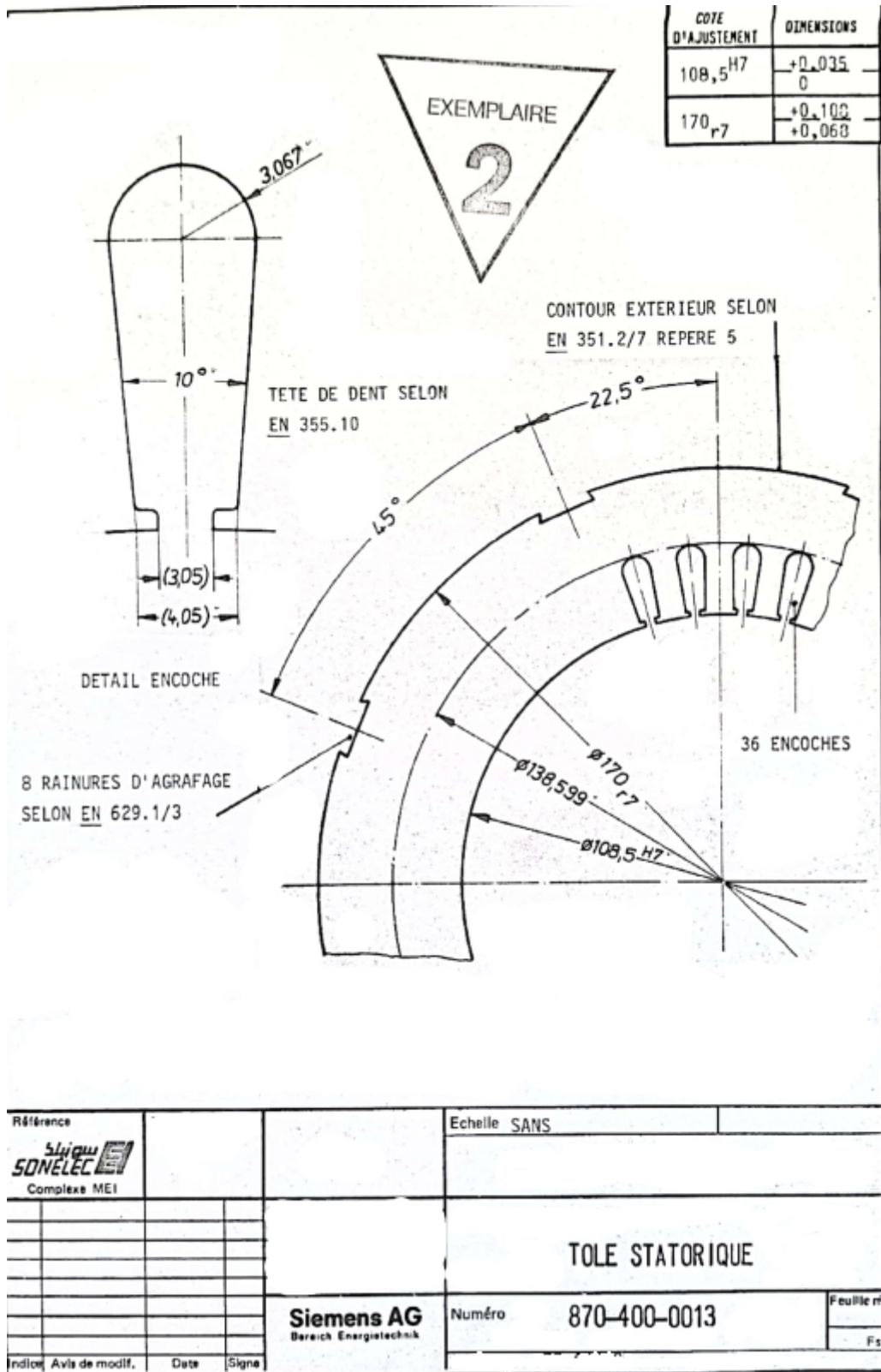
- [20] <https://www.electro-industries.com/spip.php?article4>

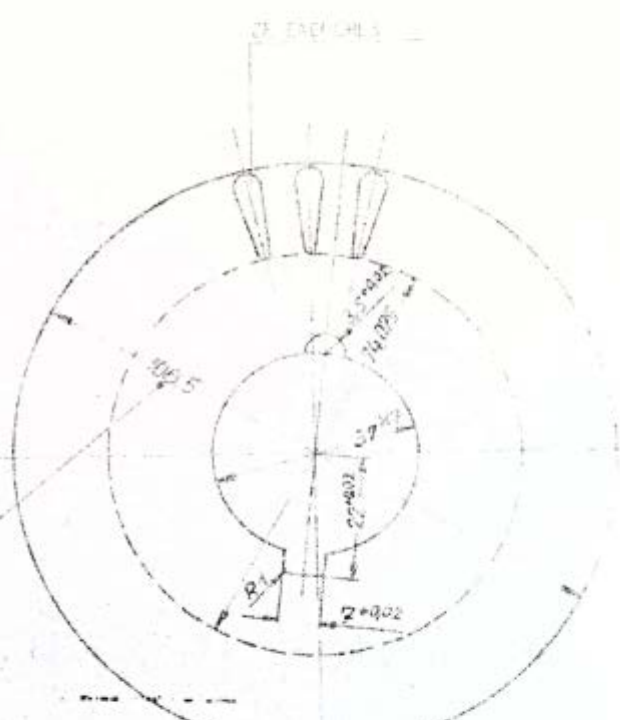
Annexe A

1. Introduction

Dans cette partie, nous allons mettre les fichiers supplémentaires que nous avons utilise dans ce projet



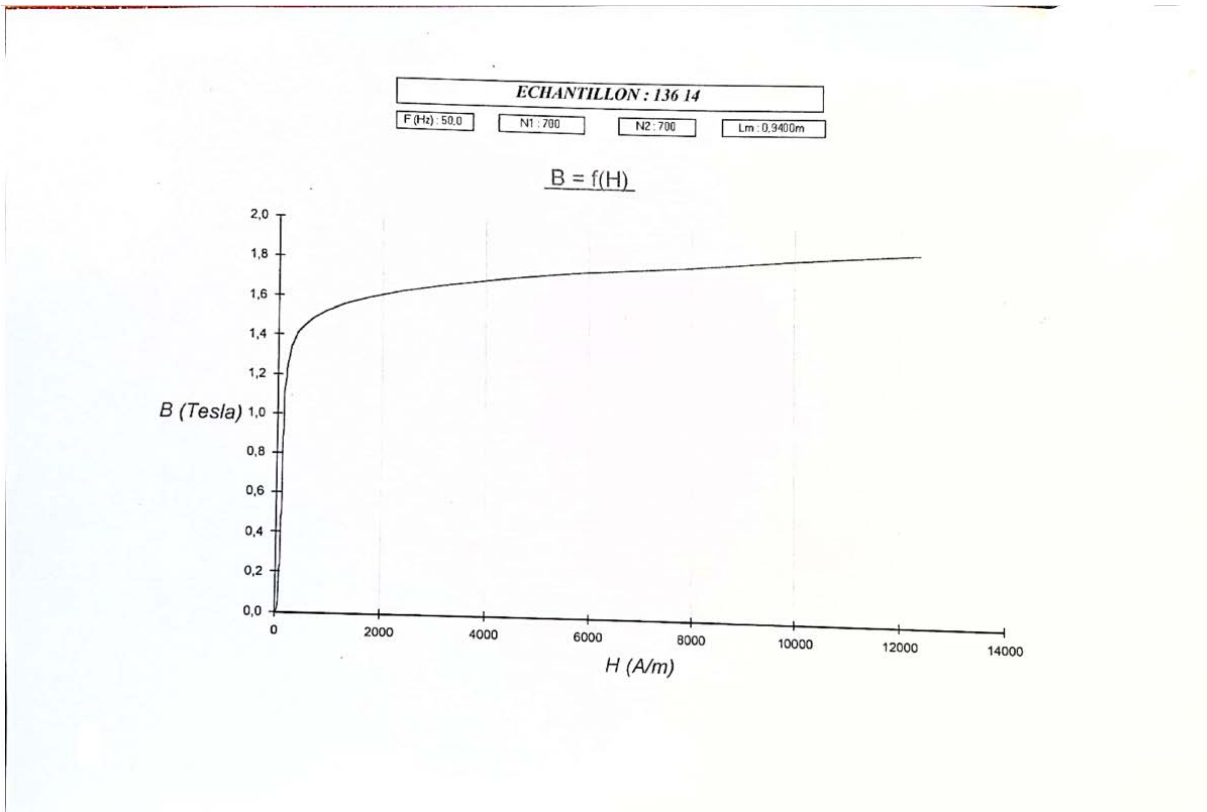




EXEMPLAIRE
4

SEULEMENT POUR INFORMATIO
NE SERA PAS PRIS EN COMPT. EN CAS DE MODIFICATI

 Cor. des. M.	10X. COIE. A. IRE. DIN 1168 FIN	EN 351.10	E. Livré 1.1 / 0.1
			Date 25.05.01 Des. SEITZ Vint. GEBM. S. L. N. 2 Norm.
Siemens AG		(Signature)	





VETTINER

RAPPORT DE MESURE

ECHANTILLON :

jeudi 23 octobre 2014

Masse active : 0,9890 Kg

Section utile : 1,3500 cm²

Température : 22,5 °C

F : 50,0 Hz

N1 : 700

N2 : 700

Lm : 0,9400 m

Observations : produit ASEMÉTAL M800-50A

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	Ss (VA/Kg)	μa
1,876	1,238 e+4	8,560 e+0	2,662 e+2	1,206 e+2
1,836	9,900 e+3	8,290 e+0	2,042 e+2	1,476 e+2
1,795	7,880 e+3	8,010 e+0	1,544 e+2	1,813 e+2
1,756	5,785 e+3	7,240 e+0	1,148 e+2	2,416 e+2
1,717	4,432 e+3	7,000 e+0	8,321 e+1	3,083 e+2
1,678	3,229 e+3	6,740 e+0	5,923 e+1	4,135 e+2
1,639	2,359 e+3	6,386 e+0	4,195 e+1	5,529 e+2
1,600	1,734 e+3	6,103 e+0	2,985 e+1	7,343 e+2
1,562	1,254 e+3	5,808 e+0	2,131 e+1	9,912 e+2
1,524	9,150 e+2	5,507 e+0	1,547 e+1	1,325 e+3
1,487	6,592 e+2	5,195 e+0	1,157 e+1	1,795 e+3
1,449	4,922 e+2	4,893 e+0	9,086 e+0	2,343 e+3
1,411	3,833 e+2	4,603 e+0	7,462 e+0	2,929 e+3
1,373	3,116 e+2	4,334 e+0	6,380 e+0	3,506 e+3
1,335	2,583 e+2	4,082 e+0	5,607 e+0	4,113 e+3
1,297	2,229 e+2	3,848 e+0	5,034 e+0	4,630 e+3
1,258	1,946 e+2	3,633 e+0	4,571 e+0	5,144 e+3
1,220	1,753 e+2	3,432 e+0	4,203 e+0	5,538 e+3
1,183	1,593 e+2	3,241 e+0	3,887 e+0	5,910 e+3
1,145	1,452 e+2	3,059 e+0	3,601 e+0	6,275 e+3
1,107	1,380 e+2	2,877 e+0	3,354 e+0	6,383 e+3
1,070	1,316 e+2	2,704 e+0	3,121 e+0	6,470 e+3
1,032	1,270 e+2	2,536 e+0	2,914 e+0	6,466 e+3
0,994	1,232 e+2	2,369 e+0	2,793 e+0	6,420 e+3
0,957	1,234 e+2	2,223 e+0	2,640 e+0	6,171 e+3
0,919	1,188 e+2	2,080 e+0	2,462 e+0	6,156 e+3
0,881	1,174 e+2	1,947 e+0	2,316 e+0	5,972 e+3
0,843	1,176 e+2	1,824 e+0	2,190 e+0	5,704 e+3

VETTINER ESSAI:136 14.Tst

