الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Projet de Fin d'Etudes

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en électrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Thème

Diagnostic de défauts dans une MAS en utilisant la méthode des éléments finis

Proposé et dirigé par :

Dr. HACHLEF RADOUANE

Dr. HOUASSINE Hamza

Préparé et présenté par :

Mr. SMAIDA abdelhay

Mr. RAFA younes

Dédicace

Au nom de dieu le clément et le miséricordieux

Je dédie ce modeste travail, le résultat précoce du long

Parcours de la vie à :

A toute ma famille

Mon partenaire HOUASSINE HAMZA ET HACHLEF

RADOUANE.

Ainsi que toute la promotion 2016 Réseaux électriques.

Et en fin a tout ceux qui m'aime.

SMAIDA ABDELHAY

Dédicace

Au nom de dieu le clément et le miséricordieux

Je dédie ce modeste travail, le résultat précoce du long parcours de la vie à :

Toute ma famille

Mon partenaire HOUASSINE HAMZA ET HACHLEF RADOUANE.

Ainsi que toute la promotion 2016 Réseaux électriques.

Et en fin a tout ceux qui m'aime.

RAFA YOUNES

ملخص

يهد ف هذا العمل الى تشخيص الا عطا ب الكهر بائيه في المحرك اللا تزا مني بطريقة العنا صر المنتهية، لذا:

قمنا بإجراء دراسة نظرية وعملية على الخصائص الميكانيكية والكهربائية لمحرك لاتزامني ، وذلك باستخدام برنامج FLUX2D الذي يعتمد على حل معادلات الحقل الكهرومغناطيسي بواسطة طريقة العناصر المنتهية.

و بعد الحصول علي نتائج المحاكات و تحويلها الي التحليل الطيفي و بالتا لي التعرف علي الا عطا ب.

كلمات مفتاحية

طريقة العناصر المنتهية، محرك لاتزامني ، برنامج حساب الحقل الكهرومغناطيسي.

Abstract

The objective of this work is the diagnosis of electrical faults in an induction machine using the finite element method for this:

We carried out a theoretical and practical study of the electric and mechanical characteristics of an asynchronous motor by using a numerical code FLUX2D which is based on the resolution of the equations of the electromagnetic field by using the finite element method.

And after getting the results of the simulation and converted to spectral analysis, we will see the flaws of the machine.

Keys words

Finite element method, asynchronous motor wi, Code FLUX2D.

Résumé

L'objectif de ce travail est de diagnostic des défauts électriques dans une machine asynchrone en utilisant la méthode des éléments finis, pour cela:

Nous avons effectué une étude, théorique et pratique, portant sur les caractéristiques électrique et mécanique d’un moteur asynchrone en utilisant le code de calcul numérique FLUX2D qui est basé sur la méthode des éléments finis.

Et après avoir obtenu les résultats de la simulation et converti à l'analyse spectrale, on va voir les défauts du machine.

Mots clés

Méthode des éléments finis, moteur asynchrone, code de calcul du champ électromagnétique FLUX2D.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur, Coencadreur, M.Hachlef radouane et M.Houacine hamza pour son dévouement, ces conseils et son soutien moral tout le long de l'élaboration de ce travail.

Ainsi que nous remercions pour toute l'aide et le soutien qu'il nous a offert tout au long de nos études.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci

Sommaire

Introduction Générale……..1

Chapitre I: Généralité Sur la Machine Asynchrone

I-1: Introduction :…….…….….3

I.2: Rôle:…….…….....3

I.3: Symbole:…….……..3

I.4: Éléments de Constitution de la Machine Asynchrone…….…….....4

I.4.1: Le stator…….……5

I.4.2: Le Rotor:……...6

I.4.2.1: Rotor Babine:……....6

I.4.2.2: Rotor à cage:…….…....7

I.5: Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone:…….…...7

I.6: Les organes mécaniques:…….……8

I.7: Différents types de défauts :…….…...8

I.7.1: Défauts mécaniques:……....…....8

I.7.2: Défauts électriques:…….……..8

I.7.3: Défauts de fabrication:…….....8

I.7.4: Défauts électromagnétiques:……9

I.8:Cause des défauts:……9

I-9:Défaillances au stator:…….……11

I-9.1:Défauts d'isolant dans un enroulement:…….……11

I-9.2: Court-circuit entre spires:…….....11

I-9.3: Court-circuit entre phases –bâti:……....12

I-9.4: Court-circuit phase-bâti:…….…12

I-9.5:Défauts de circuit magnétique:……....13

I-10:Défaillance au rotor:……..13

I-10.1:Cassures de barres:……..…….……..……13

I-10.2: Cassure d'une portion d'anneau de court-circuit:……..14

I-10.3:Excentricité:…….15

I-11:Défaillance d'ordre mécanique:……16

I-12:Synthèse des défaillances:…….….17

Conclusion:……..…20

Chapitre II: Présentation de la Méthode des Eléments Finis

II.1: Introduction.....21

II.2:Formulations…….……...….....21

II.3 : Le principe de la MEF……...…….…..….23

II.4 Comportement des milieux ……...…..…24

II.5Conditions d'interface…….....…..25

II.6 Conditions aux limites…….....….27

II.7 Condition mixte Dirichlet – Neumann……..…….27

II.8:Le modèle employé.....28

II.8.1: Le mode magnétostatique…….…….....28

II.8.2:Le mode magnétodynamique……..….29

II.8.3: Le mode magnétique transitoire……..……..…29

II.9 : Calcul des grandeurs locales et globales…….……....31

II.9.1:Calcul de l'induction au niveau du rayon alésage….....31

II.9.2:Calcul du flux…….....…...32

II.9.3:Calcul du couple……..….....32

II-10: Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis……..……34
II-10-1:Avantages…….…….....34
II-10-2:Inconvénients……..…….…….34
II.11: Conclusion……...……34

Chapitre III: Exploitation du modèle E F pour l'étude de la MAS

III.1: Introduction……...…….…..35
III.2: Présentation dimensionnel de la machine étudiée…….....……..….35
III.3: Présentation de l'outil de calcul numérique utilisé…….....……..38
III.3.1: Présentation du logiciel FLUX2D……..……..38
III.3.1: Procédure de construction du modèle par FLUX2D…….....……40
III.4:Génération du maillage.....41
III.5:Création des matériaux……...…….....……...43
III.6:Le circuit électrique……...….....44
III.7:Exploitation du résultat…….…….....45
III.7.1:Pour une machine saine…….....…45
III.7.2:Pour une machine défaillent.……...…51
III.7.2.1:Cas d'un court circuit……..……...…….…….....…51
III.7.2.2:Cas d'un circuit ouvert.…….....…….…….…….....…57
III.8: Conclusion…….…….…….....61
Conclusion Générale…….……...……...…….……...…62

LISTE DE FIGURE

Figure (I-1): Rôle de la machine asynchrone**…….…….……*03***

Figure (I-2): symbole générale d'un moteur asynchrone triphasé**……...……...……**03

Figure (I-3) symbole générale d'un générateur asynchrone triphasé**…….**03

Figure (I-4) machine asynchrone avec le Stator et le Rotor qui la constituent **……...*…04***

Figure (I-5) stator d'une machine asynchrone**…….…….……*05***

Figure (I-6) Rotor bobiné **…….……..….*06***

Figure (I-7) rotor d'une machine asynchrone **……..……...….*07***

Figure (I-8) Proportion des defaults**…….……. ……...*09***

Figure (I-9) Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances**...***10*

Figure (I.10) Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances**…….…..…...*10***

Figure(I.11) Défaut d'une barre cassée **…….…..…...*13***

Figure(I.12):Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit**…….**14

Figure (I.13) Représentation de l'excentricité statique et dynamique**……..…….....*15***

Figure (I-14) Roulement à billes**…….…….....*17***

Figure (II-1) fonction d'interpolation d'un élément **……..…….……..….*24***

Figure (II-2) l'interface entre 2 milieux**……. ……..…….…....25**

Figure (II-3) domaine et frontière **……..……..……27**

Figure (II-4) présentation du domaine d'étude **…….…….…..….*30***

Figures (III-1) Vue de la machine étudiée**……35**

Figure (III-2) Dimensions et formes des encoches statorique et rotorique**…….……..37**

Figure (III-3) Dimensions du Stator et de Rotor**…….……..37**

Figure (III-4) Circuit magnétique de la machine étudiée **……39**

Figure (III-5) Répartition du maillage**……42**

Figure(III.6) la courbe d'aimantation b(h) du matériau ferromagnétique**.....*43***

Figure(III.7) Circuit électrique**……...44**

Figure(III.8) La distribution des lignes du champ**…… ……...45**

Figure(III.9) La courbe de vitesse**……..……..…….*46***

Figure (III-10) Spectre de vitesse**.....*46***

Figure (III-11) Courbe de tension…**…….……*47***

Figure (III-12) Spectre de tension**.……....47**

Figure(III.13) Courbe de courant …**…….....*48***

Figure(III.14) Spectre du courant …**……...*48***

Figure(III.15) Courbe du couple…**…….. .....*49***

Figure(III.16) Spectre du couple**…….……..……...*49***

Figure (III-17) La distribution des lignes de champ**.....*51***

Figure (III-18) Courbe de vitesse**.....*52***

Figure (III-19) Spectre de vitesse.....**…….*53***

Figure(III.20) Courbe de couple**…….....*53***

Figure(III.21) Spectre du couple**……..…….…...*54***

Figure(III.22) Courbe du courant de phaseA1**…….. .....*54***

Figure(III.23) Courbe du courant des trois phases**……..*55***

Figure (III-24) Spectre du courant**.....*55***

Figure (III-25) La distribution des lignes de champ**……*57***

Figure (III-26) Courbe du courant des trois phases**……58**

Figure(III.27) Spectre du courant…….***58***

Figure(III.28) Courbe de vitesse.……***59***

Figure(III.29) Spectre de vitesse..…….. .....***59***

Figure(III.30) Courbe du couple……..***60***

Figure (III-31) Spectre du couple.....***69***

LISTE DES TABLEAUX

Tableau(I.1) Synthèse des défaillances du stator, rotor et mécanique de la MAS**.....**18

Tableau(III.1) Paramètre et dimension du la MAS**……..…….……**36

Introduction Générale

Le diagnostic des machines électriques s'est largement 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 international, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour objectif principal de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système.

Le travail, proposé, concerne le diagnostic des machines asynchrones triphasées.

La croissance de ce type de machine électrique, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la retrouvons dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, le pétrole, la chimie ou encore les transports ferroviaires.

L'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, par conséquent, un coût de réparation non négligeable (cas des machines de forte puissance) sans oublier la perte de production occasionnée. [1]

Nous nous intéressons dans ce travail à :

- la modélisation magnétodynamique en régime transitoire d'une machine asynchrone, en utilisant la méthode des éléments.

Notre travail s’articule autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une vue globale sur les machines asynchrone, et particulièrement la constitution, le principe de fonctionnement, les défauts et leurs causes.

Le deuxième chapitre est consacré à la formulation mathématique nécessaire pour la modélisation numérique d'un système électromagnétique, et l’application de la méthode des éléments finis au calcul d’une MAS en régime transitoire.

Le dernier chapitre, nous exploitons le modèle numérique de calcul de champ, développé dans le deuxième chapitre, à l'aide du code numérique FLUX2D. Nous présentons les résultats de simulation obtenus pour les différents modes de fonctionnement de la MAS.

I-1: **INTRODUCTION** :

Le premier chapitre a pour objectif de revenir rapidement sur la constitution des machines asynchrones et de synthétiser les différents défauts pouvant survenir sur chacun d'eux et a en passant brièvement sur les techniques de base couramment utilisées dans ce domaine[2].

I.2 Rôle

Dans les machines électriques peuvent être trouvées deux catégories ***(Figure I.1)***:

- Générateurs: qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Moteurs: qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique.

Le moteur asynchrone (ou moteur d'induction) permet la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique [3].

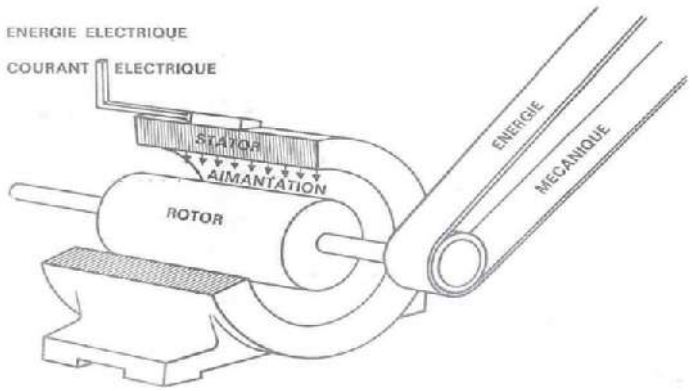


Figure (I-1): Rôle de la machine asynchrone.

I.3: Symbole:

La machine asynchrone peut être représentée par son symbole normalisé général qui précise si elle fonctionne en moteur, ou en générateur.

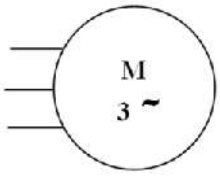


Figure (I-2): symbole générale d'un moteur asynchrone triphasé

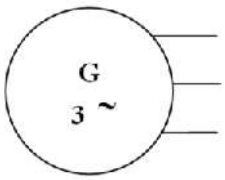


Figure (I-3): symbole générale d'un générateur asynchrone triphasé

I-4: ELEMENTS DE CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRON

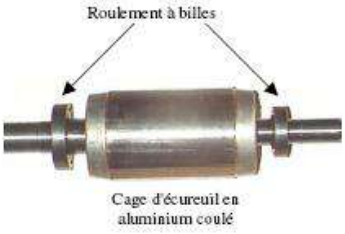
La machine à induction comprend un stator et un rotor constitués de tôles d'acier au Silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation sur le quel sont placés les enroulements qui seront accessibles de l'extérieur.



Machine asynchrone



Stator



Rotor

Figure (I-4): machine asynchrone avec le Stator et le Rotor qui la constituent

I-4-1: Le stator :

Le circuit magnétique est un empilement de tôles d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude (figure I.5). Le bobinage statorique est constitué de deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Quant aux têtes de bobines elles permettent la fermeture des courants en organisant leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique.

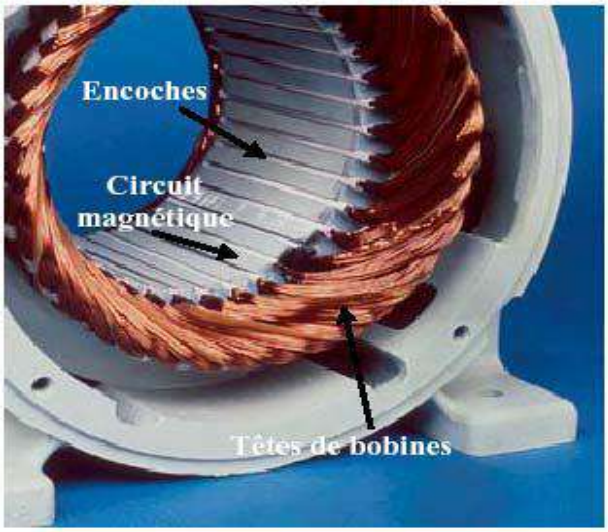


Figure (I-5): stator d'une machine asynchrone

I-4-2: Le Rotor :

Le circuit magnétique du rotor est constitué d'un assemblage de tôles ferromagnétiques rainurées. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un noyau. On trouve deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil.

I-4-2-1:Rotor Bobiné:

Les enroulements rotoriques sont localisés dans les encoches situées à la périphérie du rotor. Ces enroulements sont bobinés de manière à obtenir un enroulement triphasé à « p » paires de pôle. Les bobinages rotoriques sont toujours couplés en étoile, et les trois bornes accessibles sont reliées à la carcasse du stator à l'aide d'un système constitué de trois bagues tournants et de trois balais fixes [2].

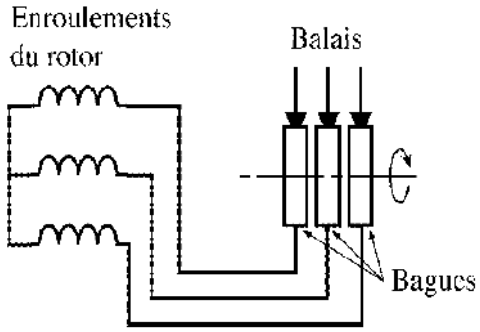


Figure (I-6): Rotor bobiné [03].

I-4-2-2Rotor à cage:

La grande majorité des moteurs sont à cages. Dans chaque encoche rotorique est placée une barre. Ces barres sont en cuivre pour les moteurs de forte puissance, et en alliage d'aluminium pour les machines de faible et moyenne puissance. Elles sont réunies à chaque extrémité du rotor par des anneaux réalisant le court-circuit. L'enroulement rotorique ainsi réalisé n'est pas accessible à partir du stator.

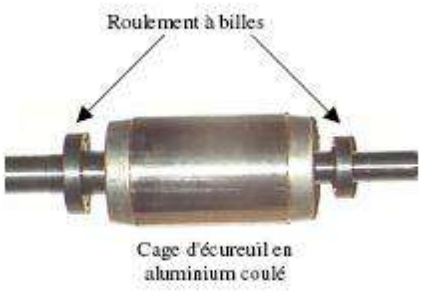


Figure (I-7): *rotor d'une machine asynchrone*

I-5: Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone:

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant crée par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur : le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant:

$$n_1 = \frac{f}{p}$$

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone (sans collecteur) n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n1) diffère de celle du rotor (n), c'est-à-dire, lorsque $n \neq n1$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $n = n1$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique [2].

$$g = (n_1 - n)/n_1$$

I-6:Les organes mécaniques:

La carcasse joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre et un organe de transmission comprenant une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement.

Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent sa libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre.

Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre du aux dissymétries_des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.

I-7:Différents types de défauts :

Les principaux défauts de la machine asynchrone peuvent être d'ordre électrique et/ou mécanique.

I-7-1:Défauts électriques:

De tels défauts sont dus à un court circuit, à un circuit ouvert au niveau du bobinage statorique ou à une connexion anormale des enroulements statoriques.

I-7-2: Défauts mécaniques:

Un mauvais isolement des conducteurs des enroulements statoriques, et une mauvaise brasure lors de l'encastrement des barres et des anneaux du rotor peuvent causer un sérieux disfonctionnement de la machine.

I-7-3: Défauts de fabrication:

-Ecaillage des pistes des roulements de l'arbre mécanique;

-Ovalisation de l'alésage statorique ou rotorique résultant d'un défaut d'usinage;

-Non alignement des axes du stator et du rotor;

-Saillance de l'alésage;

I-7-4:Défauts électromagnétiques:

Ces défauts peuvent être dus à l'excentricité de l'entrefer ou à la déformation de l'arbre. Un défaut de d'excentricité provoque un balourd magnétique ce qui fait que l'induction au niveau de l'entrefer n'est plus uniforme dans la direction radiale ou axiale donnent ainsi naissance à des forces attractives non régulières entre le stator et le rotor, provoquant des secousses de la cage. La déformation de l'arbre peut provoquer un frottement entre le rotor et le stator provoquant ainsi un endommagement grave du circuit magnétique et des enroulements de la machine.

I-8:Cause des défauts:

Les causes des défauts sont multiples, elles peuvent être classées en trois groupes:

-Les initiateurs des défauts: surchauffe du moteur, usure des éléments mécaniques (roulement abeilles), rupture de fixation, problème d'isolation électrique, déséquilibre détentions et des courants de ligne.

-Les contributions aux défauts: surcharge fréquente, température ambiante élevée, ventilation défaillante, humidité, fortes vibrations, vieillissement.

-Les défauts et erreurs humaines: défauts de fabrication, composants défectueux, protection inadaptées, absence de maintenance. [5]

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels [All 88] sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (De 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants [4] :

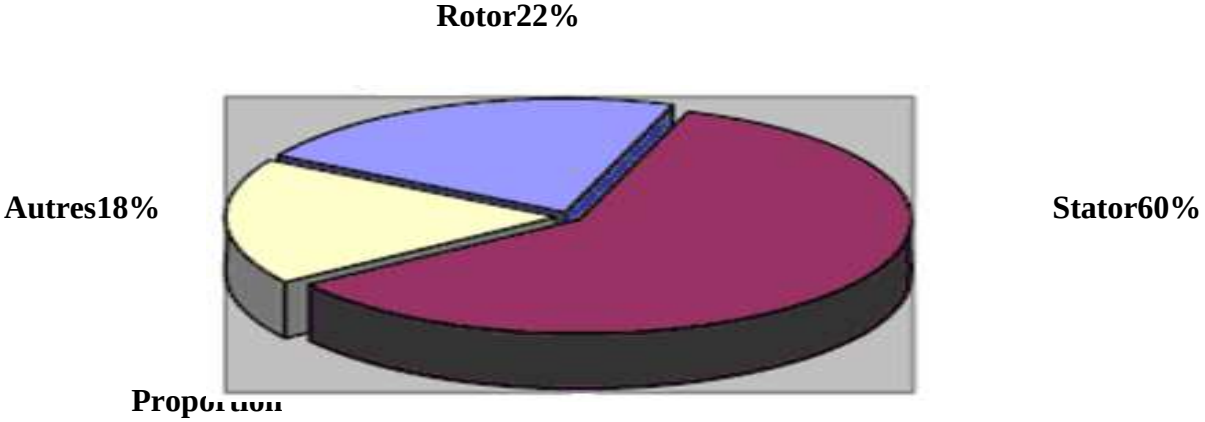


Figure (I-8) : Proportion des défauts

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure (1.5)

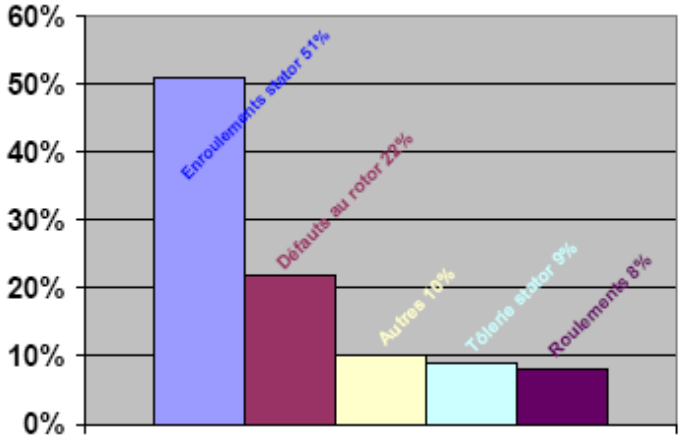
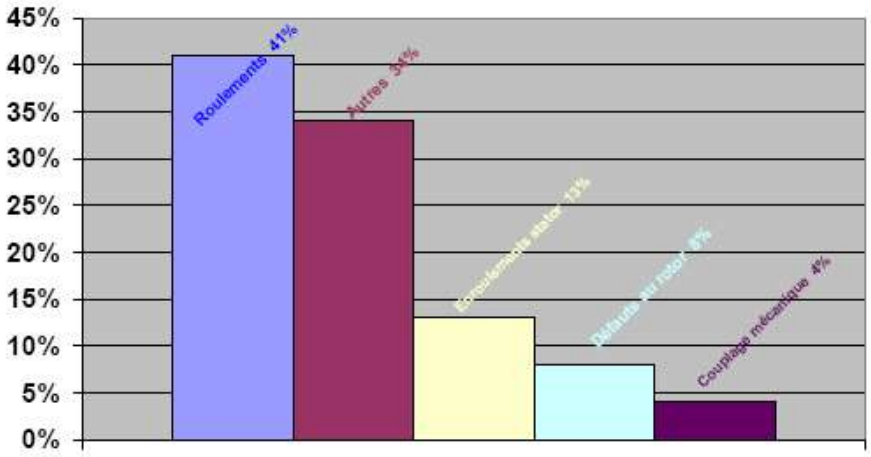


Figure (I-9): Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur la figure (1.6)



Figure(I.10): Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances

I-9:Défaillances au stator:

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème thermique (surcharge), électrique (diélectrique), mécanique (bobinage,) et environnemental (agression,…etc.). Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

I-9-1:Défauts d'isolant dans un enroulement:

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,…etc.) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or, les matériaux d'isolation ont une limite thermique, électrique et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce dernier se dégrade de manière prématurée ou accélérée, jusqu'a à la cassure totale. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Vibrations mécaniques.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, ou à une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- Vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Fonctionnement dans un environnement sévère.

I-9-2: Court-circuit entre spires:

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude sur les autres phases modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage. De ce fait, une dégradation accélérée des isolants, peut provoquer, ainsi, un défaut en cascade (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste, sensiblement, identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.

I-9-3: Court-circuit entre phases –bâti:

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

L'apparition d'un court-circuit, proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre 2 phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

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

I-9-4: Court-circuit phase-bâti:

Le bâti a, généralement, un potentiel flottant. Mais, pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel. A l'exception des effets capacitifs, le bâti prend, alors, le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit.

Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux. Il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas.

Cependant, le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, ce type de défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [4].

I-9-5:Défauts de circuit magnétique*:*

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomène de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc. [06]

I-10:Défaillance au rotor:

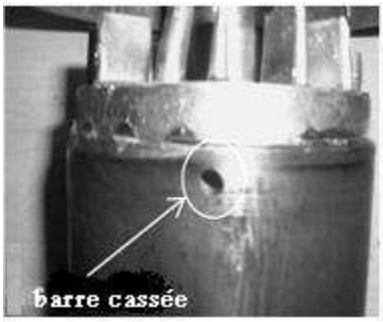
Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

• thermique (surcharge,…)
• électromagnétique (force en *B*2 (*t*),…)
• résiduel (déformation,…)
• dynamique (arbre de transmission,…)
• mécanique (roulement,…)
• environnemental (agression,…)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit [06]:

I-10-1: Les cassures des barres:

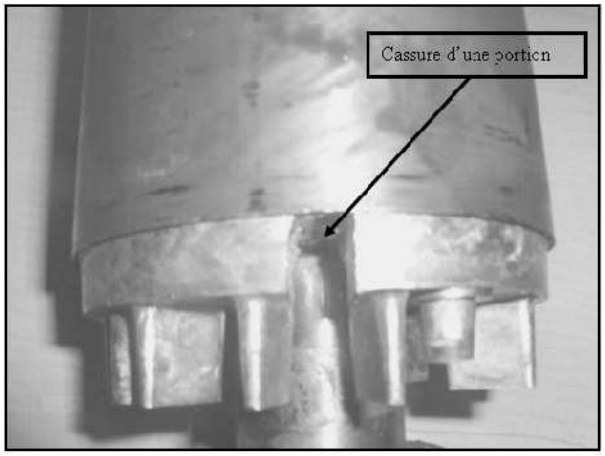
Ces défauts apparaissent au niveau du rotor. Ce sont les défauts les plus fréquents. Ils se présentent par des ruptures totales ou partielles d'une (s) barre (s) au niveau de la cage d'écureuil (exemple **Fig. I.11** rotor avec une barre cassée). Ces défauts se traduisent par une augmentation de la résistance équivalente d'un enroulement rotorique. Ces pannes rotoriques engendrent, malheureusement, des ondulations du couple électromagnétique qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation de la machine. Ce qui génère des défauts mécaniques en plus dans la machine.



Figure(I.11):Défaut d'une barre cassée

I-10-2: Cassure d'une portion d'anneau de court-circuit:

Les cassures des portions d'anneaux sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations entre les barres et les anneaux (exemple **Fig I.12** rotor avec une portion d'anneau de court-circuit cassée). Les anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Un mouvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge du couple et donc du courant peuvent entraîner leurs cassures. La cassure d'une portion d'anneau engendre un comportement similaire à celui de la cassure des barres.



Figure(I.12):Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.

Suite à l'apparition de ces défauts, la machine continue à fonctionner et il est donc difficile de détecter ces défaillances. Le courant, que conduit une barre cassée, se répartit sur les autres barres. Ces dernières seront surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures et par la suite à la rupture d'un nombre plus important de barres **[1]**.

I-10-3:Excentricité:

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor qui se traduit par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure) à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués **:**

- L'excentricité statique dans laquelle le rotor est déplacé au centre de l'alésage mais tourne toujours autour de son axe. Ce défaut peut avoir comme origine un problème d'assemblage ou une légère forme ovale du stator et /ou du rotor.
- L'excentricité dynamique dans laquelle le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- L'excentricité mixte est la combinaison des excentricités statique et dynamique. Dans la plupart des cas, on observe cette forme d'excentration.



Excentricité statique Excentricité dynamique

(Plusieurs positions du rotor au cours de la rotation)

Figure(I.13): Représentation de l'excentricité statique et dynamique

Ce défaut modifie les comportements magnétiques et mécacanique da la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en

raison des forces d'attraction magnétiques qui déséquilibre le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérable dans les enroulements **[06]**.

I-11:Défaillance d'ordre mécanique:

Défauts des roulements:

Ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est, généralement, lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Les causes possibles sont :

- L'usure due au vieillissement.
- La température de fonctionnement élevée.
- La perte de lubrification.
- L'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement).
- Le défaut de montage.
- Les courants d'arbres (Shaft Current).

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- Des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- L'ondulation de leur surface de roulement.
- L'attaque des billes.
- La corrosion due à l'eau.
- Défaut de graissage, problème dû à la température.
- Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge.



Figure (I-14): Roulement à billes

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entrainant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur [4].

I-12:Synthèse des défaillances:

Le tableau I.1 répertoire une liste non exhaustive des défaillances pouvant se produire dans une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil en définissant son lieu d'apparition, ses causes possibles et ses effets ainsi que les différents observables possibles.

Composants	**Défaillances**	**Causes possibles**	**Effets sur le système**	**Observables**
Stator	Court circuit entre spires	Défaut d'isolants	-Courant statorique, variation de l'amplitude sur les autres phases, modification du facteur de puissance. - courant rotorique	- température - Vibration - Courant - Puissance instantanée
	Court-circuit entre phases	Décharge partielle	Dépend fortement de la localisation Proche de l'alimentation Fusion des conducteurs Disjonction par la protection Proche du neutre Courants dans les barres et les anneaux Déséquilibre des courants statoriques	-Courant (déséquilibre) -Température -Tension -Puissance instantanée
	Court-circuit phase/bâti	Dégradation des isolants	Courant dans la phase De la température Défaut d'isolants Apparition d'une composante homopolaire Couple pulsatoire	Courant de fuite
	Rupture de barres	Surcharge	Réduction de la valeur moyenne de	-Vibration -Couple

			couple électromagnétique Oscillation de la vitesse Vibrations mécaniques	électromagnétique - Courant
Rotor	Rupture d'anneaux	Bulles coulées Dilatation différentielle Surcharge du couple Détérioration des conditions de fonctionnement	Déséquilibre la répartition des courants Modulation d'amplitude des courants statoriques	-Courant -Vibrations
		Excentricité	Positionnement incorrecte des paliers lors de l'assemblage Usure des roulements Défaut de charge Défaut de fabrication	Balourd (mécanique et magnétique) -Oscillation da couple
Mécanique	Roulement à billes	Usure Température élevée Perte de lubrification Défaut de montage Huile contaminée	Oscillation du couple de charge − Pertes − Vibrations Altération de l'équilibre magnétique	− Vibration − Courant − Puissance instantanée − Variables mécaniques

Tableau (I.1): Synthèse des défaillances du stator, rotor et mécanique de la machine asynchrone.

I-13:Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons établi une description de la machine asynchrone et sa structure (le stator, les différents types du rotor, et les différents types de défauts, et les causes de défaut). La machine asynchrone qui fait actuellement l'objet d'un intérêt accru dans plusieurs applications, ceci étant dû essentiellement à sa fiabilité, son coût relativement faible, sa robustesse et sa simplicité de construction, malheureusement sa commande est relativement complexe; le couple et le flux sont fortement couplés car les deux grandeurs dépendent à la fois des courants statoriques et rotoriques.

II.1 : Introduction:

La méthode à éléments finis est une approche qui nécessite un temps de calcul important.

Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de faibles dimensions pour permettre de considérer que le matériau magnétique est linéaire sur les surfaces correspondantes.

L'utilisation des équations de Maxwell, à partir des formes locales, permet de résoudre le problème. La résolution analytique correspondante est complexe et ne permet de traiter le phénomène de saturation que de façon approchée. De nombreux logiciels ont été développe à cet effet, tel que le Flux 2D, le Flux 3D ou encore Maxwell. Le but de ces logiciels est de déterminer la cartographie du champ magnétique présent dans les machines électriques afin d'optimiser leurs dimensionnements.

II.2:Formulations:

Considérons un certain domaine (Ω) dans lequel un champ A, scalaire ou vectoriel, est la solution de l'équation aux dérivées partielles suivante :

$$D(A)=F \qquad \text{(II.1)}$$

Où D est un opérateur différentiel et F est une fonction connue, appelée terme de source. Pour spécifier entièrement le champ A, il faut tenir compte des conditions aux limites Γ du domaine (Ω)

$$L(A) = G\frac{\partial A}{\partial t} + HA \qquad \text{(II.2)}$$

Dans cette équation G et H sont des fonctions connues sur les frontières Γ. Il en est donc de même de la fonction L. On peut distinguer deux cas particuliers importants :

-Si la fonction G est nulle, on aura une condition de Dirichlet imposant la valeur du champ A sur la frontière Γ :

$$L(A)=H(A) \qquad \text{(II.3)}$$

-Si la fonction H est nulle, on aura une condition de Neumann imposant la valeur de la dérivée du champ A par rapport à la normale extérieure à la frontière Γ :

$$\mathbf{L(A)=G}\frac{\partial A}{\partial t} \qquad \textbf{(II.4)}$$

La solution de l'équation (II.1) compte tenu des conditions aux limites (II.2) peut être obtenue par une méthode de résolution numérique. La résolution numérique basée sur la méthode des éléments finis consiste à associer à celle-là un découpage du domaine Ω en sous domaines élémentaire Ωe dans lesquels le champ A est, habituellement, approximé par une fonction polynomiale. Cela va se traduire par une transformation des équations différentielles en un système d'équations algébriques dont la résolution nous permet de déterminer la distribution du champ A dans le domaine Ω.[8]

Dans les machines électriques les équations qui régissent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré. On les définies comme suit :

- Les relations de couplage électromagnétique :

$$\mathbf{rot}\ \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad \textbf{(II.5)}$$

$$\mathbf{rot}\ \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \textbf{(II.6)}$$

- Les relations de la conservation des flux :

$$\mathbf{div}\ \vec{D} = \rho \qquad \textbf{(II.7)}$$

$$\mathbf{div}\ \vec{B} = 0 \qquad \textbf{(II.8)}$$

- La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

$$\vec{D} = \vec{B}\ \vec{E} \qquad \textbf{(II.9)}$$

$$\vec{B} = \mu\ \vec{H} + \vec{B}_r \qquad \textbf{(II.10)}$$

- La relation de la loi d'Ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \qquad \textbf{(II.11)}$$

Où,

$\vec{H}$ **:** Champ magnétique (A/m)

$\vec{E}$ **:** Champ électrique (V/m)

$\vec{B}$ **:** Induction magnétique (T)

$\vec{B}_r$ **:** Induction rémanente des aimants (T)

$\vec{J}$**:** Densité de courant totale (A/m2)

μ: Perméabilité magnétique (H/m)

σ: Conductibilité électrique ($\Omega^{-1}m^{-1}$)

II.3 : LE PRINCIPE DE LA MEF:

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, Le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être approchée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), dont l'expression varie d'un type à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurées la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales

Pour un élément triangulaire on a :

$$\mathbf{Ae(x, y) = a + bx + cy} \qquad \textbf{(II.39)}$$

Pour les éléments quadrilatéraux on a:

$$\mathbf{Ae(x, y) = a + bx + cy + dcy} \qquad \textbf{(II.40)}$$

Les constantes a b c et d sont à déterminer. Le potentiel Ae est en générale non nul dans l'élément et nul ailleurs. La valeur approchée du potentiel dans un point du domaine (Ω) de résolution est donnée par :

$$\mathbf{A(x, y)} = \sum_{e=1}^{n_t} A_e \mathbf{(x, y)} \qquad \textbf{(II.41)}$$

e : Numéro d'élément.

N_e : Le nombre totale des éléments du domaine (Ω).

Le potentiel en tous points d'un élément ainsi que la densité de courant sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets (Figure. II.1).

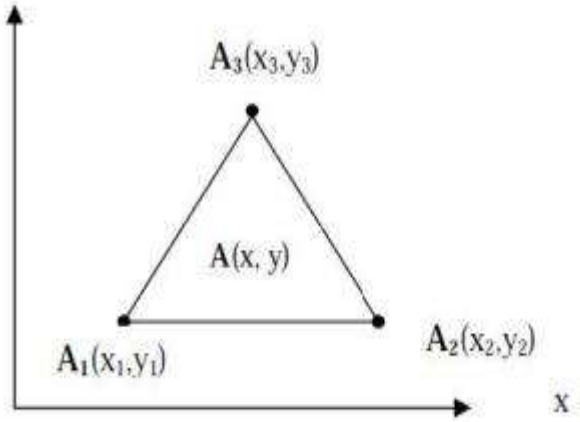


Figure. II.1: fonction d'interpolation d'un élément

II.4 Comportement des milieux:

Le comportement électrique et magnétique des différents milieux diffère d'un matériau à un autre, pour tenir compte ces particularités (c'est-à-dire les différences de matériaux), il faudra introduire des relations constitutives reliant les vecteurs (E, B, H et J). Ces relations sont les suivants :

Milieux diélectriques de permittivité relative ε_r:

$$\vec{D}=\varepsilon_r\,\varepsilon_0\,\vec{E} \qquad \textbf{(II.12)}$$

Milieux magnétiques de perméabilité relative μ:

$$\mathbf{B = \mu\, H} \qquad \textbf{(II.13)}$$

Milieux conducteurs de conductivité électrique σ:

$$\mathbf{J = \sigma\,(E + v \wedge B)} \qquad \textbf{(II.14)}$$

Les coefficients μ0, ε0 et σ désignent, respectivement, la perméabilité magnétique du vide, la permittivité du vide et la conductivité électrique du milieu. Le vecteur v représente la vitesse de déplacement dans le champ d'induction B. Ces grandeurs sont généralement des tenseurs qui permettent de tenir compte des effets d'anisotropie.

Toutefois les matériaux magnétiques sont saturables et la relation constitutive du milieu magnétique devient :

$$\vec{B}=\mu(B)\vec{H} \quad \text{où} \quad \vec{H}=\upsilon(B)\vec{B} \qquad \textbf{(II.15)}$$

où υ représente la réluctivité magnétique (υ) μ 1 = Dans notre travail, nous considérons que les matériaux utilisés sont isotropes, ce qui rend les coefficients définis précédemment comme étant des fonctions scalaires.

II.5:Conditions d'interface :

A l'interface entre deux milieux 1 et 2, les équations de Maxwell impliquent des relations de discontinuité des grandeurs électromagnétiques lors du passage d'un milieu à un autre.

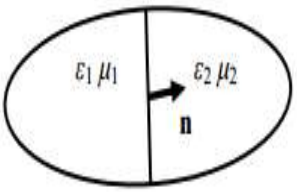


Figure (II.2):l'interface entre 2 milieux

Comme les machines électriques sont constituées de matériaux différents et que les lignes de champs sont continues à travers la machine, il est utile de définir les conditions de passage du champ entre les interfaces communes à deux domaines différents [9] :

$$\left.\begin{matrix}(\mathbf{H1}-\mathbf{H2})\wedge\mathbf{n}=\mathbf{Js}\\(\mathbf{E1}-\mathbf{E2})\wedge\mathbf{n}=\mathbf{0}\end{matrix}\right\}$$ Composants tangentielles **(II.16)**

$$\left.\begin{matrix}(\mathbf{D1}-\mathbf{D2}).\mathbf{n}=\boldsymbol{\rho}\mathbf{s}\\(\mathbf{B1}-\mathbf{B2}).\mathbf{n}=\mathbf{0}\end{matrix}\right\}$$ Composants normales **(II.17)**

Notant que n est la normale à l'interface séparant les deux milieux ; Js est la densité surfacique de courant et ρs est la densité surfacique de charge.

La formalisation en potentiel vecteur est une autre forme d'écriture des équations de Maxwell. La loi de conservation du flux magnétique, définie par l'équation implique que l'induction B dérive d'un potentiel vecteur A tel que :

$$\vec{B}=ro\vec{t}(\mathbf{A})$$

La combinaison des équations (II.5), (II.8) et (II.13) conduit à :

$$ro\vec{t}(\frac{1}{\mu}ro\ \vec{t}\ \vec{A})=\vec{J} \qquad \textbf{(II.18)}$$

L'équation (II.3) devient :

$$\vec{E}=-grad\vec{\mathbf{V}}-\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} \qquad \textbf{(II.19)}$$

V est potentiel scalaire électrique. La densité de courant totale est :

$$\vec{J}=\sigma\vec{E}+\vec{J}_0 \qquad \textbf{(II.20)}$$

Où $\sigma\vec{E}$ est la densité des courants induits, avec σ=0 dans les milieux sans courant induits J_0=0 dans les milieux sans source extérieur dans les parties active de la machine la densité de courant s'écrit alors :

$$\vec{J}=-\sigma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}+\vec{J}_0 \qquad \textbf{(II.21)}$$

L'étude se ramène à la résolution de l'une de ces équations :

$$ro\vec{t}(\frac{1}{\mu}ro\vec{t}\vec{A})=-\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}+\vec{J}_0 \qquad \textbf{(II.22)}$$

Sachant que :

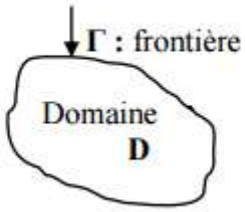
$$ro\vec{t}(ro\vec{t}\ \vec{A})=\text{grad}\ (\text{div}\vec{A})-\text{div grad}\vec{A} \qquad \textbf{(II.23)}$$

En appliquant comme condition la jauge de Coulomb (divA=0) on obtient :

$$\text{div}(\frac{1}{\mu}\text{gra}\vec{d}A)=\sigma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}-\vec{J}_0 \qquad \textbf{(II.24)}$$

II.6 Conditions aux limites

Le problème de calcul de champ électromagnétique revient à la résolution des équations aux dérivées partielle dans un domaine (D) limité par une frontière (Γ) sur laquelle sont définies les conditions aux limites. On distingue plusieurs types des conditions :



Figure(II.3): domaine et frontiére

- Condition de Dirichlet Cette condition nous informe sur la valeur de l'inconnue à la frontière du domaine de résolution Γ.

$$U = g0 \qquad \text{(II.25)}$$

Où, U est la fonction inconnue et g0 la valeur de la fonction définie le long de la frontière.

- Condition de Neumann Elle nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnue sur la limite du domaine à étudier. Elle apparait aussi souvent sur les plans de symétrie :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = g_0 \qquad \text{(II.26)}$$

II.7: Condition mixte Dirichlet – Neumann

C'est une combinaison des deux conditions aux limites de type Dirichlet et Newman qui s'exprime comme suit :

Au +b $\frac{\partial U}{\partial n}$ **= g**$_O$ a et b, sont des coefficients définis dans le domaine d'étude. - Condition périodicité et d'anti-périodicité Dans le cas des machines électriques tournantes, on retrouve une symétrie dans la distribution du champ magnétique. Cette symétrie du champ peut être exploitée pour définir un autre type de conditions aux limites qui permet de réduire la taille du domaine étudie. On parle alors des conditions cycliques (périodicité ou anti-périodicité). Elles s'expriment comme suit :

$$(\Gamma\ d + \Gamma\ K.U = \Gamma U \qquad \text{(II.27)}$$

Où

U représente la fonction inconnue et dΓ désigne la période spatiale suivant

Le contour Γ(K = 1 : condition de périodicité et K = -1 : condition anti-périodicité).

II.8:Le modèle employé :

Selon les résultats escomptés et le temps de simulation dont on dispose, trois modes de résolutions peuvent être employé :

II.8.1: Le mode magnétostatique:

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courant induits) de la machine car il impose de connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. On s'en servira essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les sources sont indépendantes du temps. Le terme

$$\frac{\partial B}{\partial t} = 0$$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} \qquad \text{(II.28)}$$

$$\text{div}\ \vec{B} = 0 \qquad \text{(II.29)}$$

$$\vec{B} = \mu\ \vec{H} + \vec{B}_r \qquad \text{(II.30)}$$

La condition (II.9) permet de définir une fonction en vecteur potentiel A telle que :

$$\vec{B} = \mathbf{ro\vec{t}}\ \vec{A} \qquad \textbf{(II.31)}$$

Pour que A soit totalement définit, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition div(A)=0 appelée jauge de **Coulomb**. Qui vérifiée automatiquement l'unicité de la solution.

Par la substitution de **(II.15)** et **(II.14)** dans **(II.12)** nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant:

$$\mathbf{ro\vec{t}(vro\vec{t}\vec{A})} = \vec{J} + \mathbf{ro\vec{t}(v.}\vec{B}_r\mathbf{)} \qquad \textbf{(II.32)}$$

Où:

v = 1/μ : est la rélectivité magnétique.

II.8.2:Le mode magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources du courant ou de la tension variant en fonction du temps, Le terme $\frac{\partial B}{\partial t}$ n'est pas nul. Et qui suppose la densité de courant sinusoïdale, et simule en régime permanent. Ce qui permet d'obtenir des valeurs convenables du courant efficace. Ce mode pourra être utilisé pour étudier un schéma équivalent de la machine. Le système à résoudre est le suivant :

$$\mathbf{ro\vec{t}(vro\vec{t}\vec{A})} + j\omega\sigma\,\vec{A} = \vec{J} \qquad \textbf{(II.33)}$$

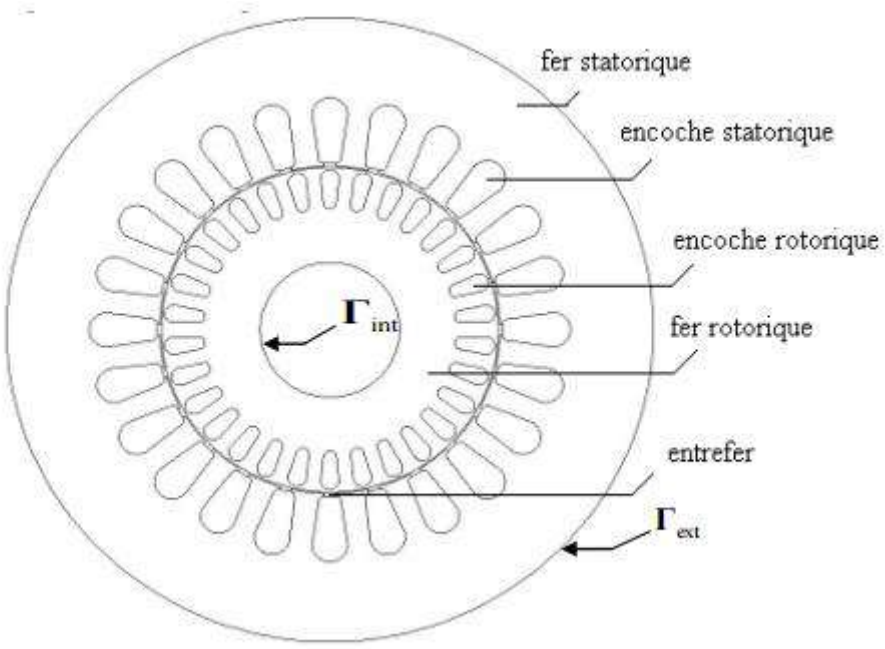
$\omega = 2\pi f$: pulsation électrique (rad.s^{-1}), j : unité imaginaire ($j^2 = -1$)

II.8.3: Le mode magnétique transitoire

Il est le plus complet. Il traduit fidèlement la rotation du moteur. Dans ce cas l'alimentation est en courant transitoire, le traitement du système des équations caractéristiques précédentes, nécessite une discrétisation pas à pas dans le temps. Donc le système à résoudre est le suivant :

$$\mathbf{ro\vec{t}(vro\vec{t}\vec{A})} + \sigma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} - \mathbf{ro\vec{t}}\ \vec{B}_r + \sigma\,\mathbf{gra\vec{d}V} = 0 \qquad \textbf{(II.34)}$$

Le domaine géométrique bidimensionnel adopté pour la résolution de l'équation du champ magnétique est représenté sur la figure suivante :



Figure(II.4): présentation du domaine d'étude

-Fer statorique et rotorique

Le stator et le rotor classique des machines à induction sont constitués de tôles isolées les unes des autres (conductivité nulle). Le potentiel vecteur dans ces deux domaines vérifie l'équation suivante :

$$\mathbf{div}\ (v_{eq}\mathbf{grad}(\bar{A})=0 \qquad \textbf{(II.35)}$$

- Les encoches statorique

En général les faisceaux des bobines placés dans les encoches statorique sont finement subdivisés en conducteurs ce qui uniformise la répartition de la densité de courant sur la surface de l'encoche. Ainsi, le potentiel vecteur dans le stator vérifie l'équation suivante :

$$\mathbf{div}\ (v\mathbf{grad}\ (\bar{A})+J_s=0 \qquad \textbf{(II.36)}$$

- Les encoches rotorique

Les encoches rotorique sont généralement constituées de barres en Cuivres ou en Aluminium. Dans ce cas, le potentiel vecteur vérifie :

$$\mathbf{div}(v_{eq}\mathbf{grad}(\bar{A}))= j\sigma g\omega\bar{A} \qquad \textbf{(II.37)}$$

Pour la surface extérieure du stator et intérieure du rotor on adopte la condition de Dirichlet, on considère que le potentiel vecteur magnétique complexe est nul

$$\bar{A} = 0 \text{ sur } \Gamma_{int} \text{ et } \Gamma_{ext} \qquad \textbf{(II.38)}$$

II.9 : CALCUL DES GRANDEURS LOCALES ETGLOBALES :

II.9.1:CALCUL DE L'INDUCTION AU NIVEAU DU RAYON ALESAGE :

Comme il a été déjà précisé dans la présentation de la méthode, le potentiel vecteur magnétique est approximé au niveau du domaine élémentaire par :

$$A_{(e)}(x,y)= \alpha_1(x,y).A_1+\alpha_2(x,y).A_2+\alpha_3(x,y).A_3$$

Et d'après l'équation ( ) nous avons :

$$B_x^{(e)}=\left[\frac{d\alpha_1}{dy} \quad \frac{d\alpha_2}{dy} \quad \frac{d\alpha_3}{dy}\right]\begin{bmatrix}A_1\\A_2\\A_3\end{bmatrix} \qquad \textbf{(II.42)}$$

$$B_y^{(e)}=\left[\frac{d\alpha_1}{dx} \quad \frac{d\alpha_2}{dx} \quad \frac{d\alpha_3}{dx}\right]\begin{bmatrix}A_1\\A_2\\A_3\end{bmatrix} \qquad \textbf{(II.43)}$$

Avec $B_x(e)$ et $B_y(e)$ sont les composantes cartésiennes de l'induction au niveau de

Chaque élément

comme $[\alpha_i]_i$=1,2,3 sont des polynômes du premier ordre ce qui implique que l'induction est constante dans l'élément et elle est assimilée au centre de gravité de l'élément d'où la nécessite d'avoir l'élément dans le même matériau.

Les équations **(II.42)** et **(II.43)** s'écrivent en coordonnées

$$\begin{cases} \mathbf{B_r}(\boldsymbol{\theta_e}) = \boldsymbol{B_x^{(e)}}.\boldsymbol{sin}(\boldsymbol{\theta_e}) + \boldsymbol{B_y^{(e)}}.\boldsymbol{cos}(\boldsymbol{\theta_e}) \\ \mathbf{B_t}(\boldsymbol{\theta_e}) = \boldsymbol{B_x^{(e)}}.\boldsymbol{sin}(\boldsymbol{\theta_e}) + \boldsymbol{B_y^{(e)}}.\boldsymbol{cos}(\boldsymbol{\theta_e}) \end{cases} \quad \textbf{(II.44)}$$

Avec $B_r(\boldsymbol{\theta}_e)$ et $B_t(\boldsymbol{\theta}_e)$ sont respectivement les composantes radiale et tangentielle de l'induction au niveau de l'élément[10].

II.9.2:Calcul du flux :

Le flux étant conservatif, il suffit de calculer le flux a travers une surface **S.**

$$\boldsymbol{\Phi} = \iint_s \overrightarrow{\boldsymbol{B}}.\overrightarrow{\boldsymbol{ds}} = \iint_s \overrightarrow{\boldsymbol{B}}.\overrightarrow{\boldsymbol{n}}\ \mathbf{ds} \qquad \textbf{(II.45)}$$

La surface **S**, dans le plan d'étude (cas bidimensionnel), est définie par un segment passant par le milieu des éléments triangulaires du maillage considéré Le flux par unité de longueur devient :

$$\boldsymbol{\Phi} = \int_x \overrightarrow{\boldsymbol{B}}.\overrightarrow{\boldsymbol{ds}} = \int_x \boldsymbol{B_y}\mathbf{dx} \qquad \textbf{(II.46)}$$

Comme la composante normale de l'induction $B_y(e)$ est constante dans un élément e, alors :

$$\boldsymbol{\Phi} = \sum_{\boldsymbol{e}=\mathbf{1}}^{\mathbf{3}} \int_{x_e} \boldsymbol{B_y^e}\mathbf{d}\boldsymbol{x_e} = \sum_{\boldsymbol{e}=\mathbf{1}}^{\mathbf{3}} \boldsymbol{B_y^e}\ \boldsymbol{\Delta x_e} \qquad \textbf{(II.47)}$$

Avec $B_Y(e)$: la composante normale de l'induction dans l'élément e

Δx_e : la longueur de l'élément e

NH : nombre de dérivations horizontales [11].

II.9.3:Calcul du couple :

Dans cette procédure, le calcul du couple se basé sur le tenseur de contrainte de Maxwell

$$\mathbf{C} = \int_r \{(\boldsymbol{r}\boldsymbol{x}\mathbf{H})\ \mathbf{B_n} - \frac{\boldsymbol{H.B}}{\mathbf{2}}\ (\boldsymbol{r}\ \boldsymbol{x}\ \boldsymbol{n})\} \qquad \textbf{(II.48)}$$

Ou est un contour entourant l'objet,

Les efforts électromagnétiques développés dans le volume V sont transmis à travers la surface S(V) délimitant ce volume.

On peut, alors évaluer cet effort par :

$$\vec{F} = -\int_s \mu_0 \left[\frac{\vec{H^2}}{2}\vec{ds} - (\vec{H}.\vec{ds})\right] \quad \textbf{(II.49)}$$

Ce qui donne

$$F_t = \int_s H_y \; B_n \; ds \quad \textbf{(II.50)}$$

$$F_n = \frac{1}{2}\int (B_t^2 - B_n^2)ds \quad \textbf{(II.51)}$$

Ou: F_t: la force tangentielle

F_n : la force normale

Dans le cas d'une machine électrique tournante, nous prendrons pour surface S, une surface situer dans l'entrefer c'est-à-dire entre le stator et le rotor

Le couple et alors crée par la composante tangentielle de F

$$C=R^*.F_t \quad \textbf{(II.52)}$$

Avec R: rayon interne de la machine

Notre étude se fait sur un modèle bidimensionnel, alors la surface S sera définie par un segment, le calcul de F_t devient :

$$F_t = F_x = \int_r \vec{H}_x \vec{B}_y dx \quad \textbf{(II.53)}$$

Avec

$$H_x = \frac{B_x}{\mu_0} \quad \textbf{(II.54)}$$

Donc

$$F_x = \frac{1}{\mu_0}\int_{xe} B_x^e \; B_y^e \; dx \quad \textbf{(II.55)}$$

Comme les grandeurs B_x(e) et B_y(e) sont le champ tangentiel et l'induction normale dans

L'élément *e* respectivement [12] :

Δx_e : la longueur de l'élément e

Donc

$$\mathbf{C} = \frac{R}{\mu_0} \sum_{e=1}^{NH} B_x^e \, B_y^e \, \Delta x_e \qquad \textbf{(II.56)}$$

II-10: Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis

II-10-1:Avantages

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

II-10-2:Inconvénients

- Mise en œuvre relativement difficile.
- Prise en considération de domaines infinis.
- Présence de singularités dans le domaine d'étude.
- Temps de calcul relativement important [3].

II.11: Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équations de Maxwell, sur la base desquelles tous les phénomènes électromagnétiques peuvent être modélisés. Nous nous sommes intéressés au modèle magnétostatique qui permet de calculer la distribution du champ magnétique et les performances électromagnétiques en régime permanent d'une machine asynchrone.

Le choix d'une formulation 2D en termes de potentiel vecteur magnétique est dû au fait, comme cela a été signalé, qu'elle permet de calculer la distribution du champ magnétique en présences des courants électriques. Pour résoudre l'équation de la magnétostatique, nous avons présenté la formulation éléments finis basée sur la méthode de Galerkine qui permet d'aboutir à un système algébrique symétrique, donc plus simple à résoudre.

III .1 Introduction:

Dans le présent chapitre, nous exploitons le modèle numérique de calcul de champ développé précédemment, pour calculer les caractéristiques de la MAS à réaliser. Une interface sous environnement FLUX 2D qui intègre les programmes de simulation des différents modes de fonctionnement de la MAS est réalisée.

III.2 Présentation dimensionnelle de la machine étudiée:

La structure de la machine asynchrone étudiée présente un stator comportant un bobinage triphasés, et un rotor classique à cage d'écureuil en aluminium. Les encoches sont 36 encoches du stator avec un nombre de pôle égal à 6.

Le rotor présente 32 barres en aluminium.

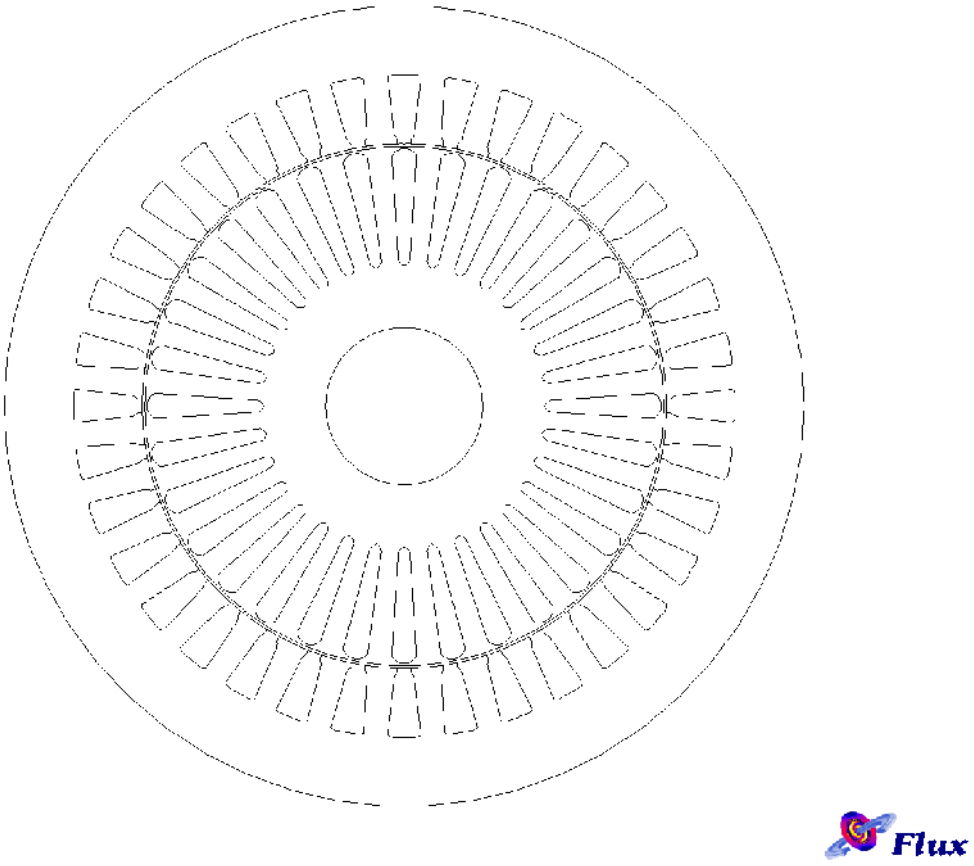


Figure III-1: Vue de la machine étudiée

Les caractéristiques dimensionnelles de la machine étudiée sont résumées dans le tableau (III.1).

Tableau III.1 : paramètre et dimensions du la MAS

Nombre de phases	3
Nombre de pôles	6
Nombre d'encoches Statorique	36
Nombre d'encoches Rotorique	32
Nombre de spires par bobine	28
Nombre de conducteurs par encoche	56
Longueur utile de fer [mm]	126
Diamètre externe de Stator [mm]	168
Diamètre d'alésage [mm]	110
Diamètre externe de Rotor	109
Diamètre d'arbre [mm]	33
Entrefer [mm]	0.5

Les dimensions géométriques des encoches de la machine sont données à la figure (III-2)

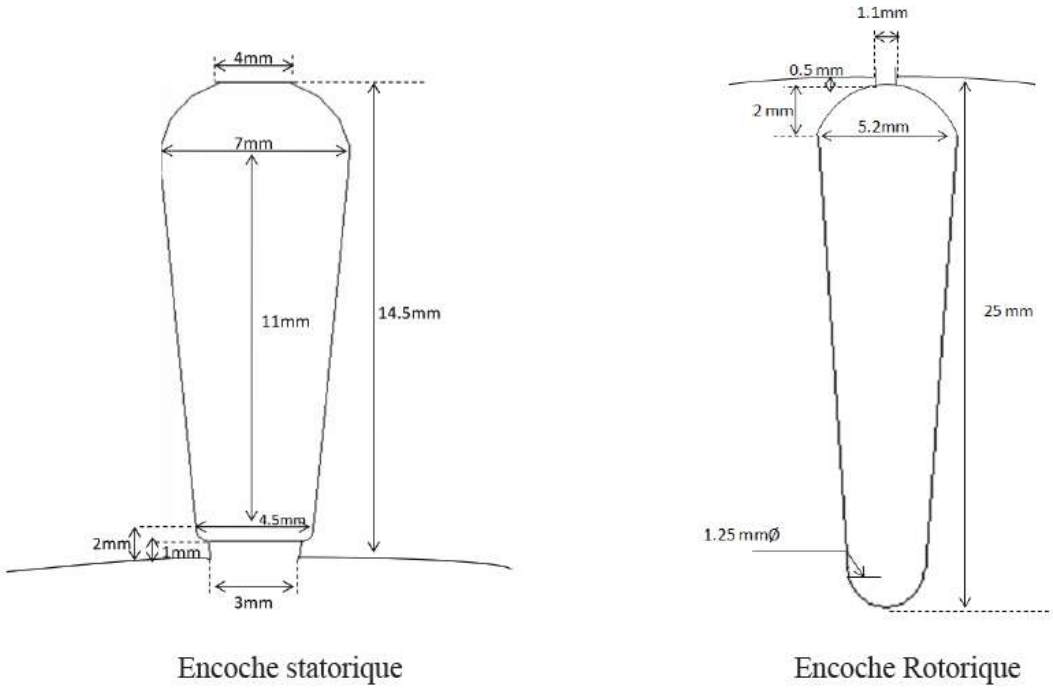


Figure (III-2) : Dimensions et formes des encoches statorique et rotorique

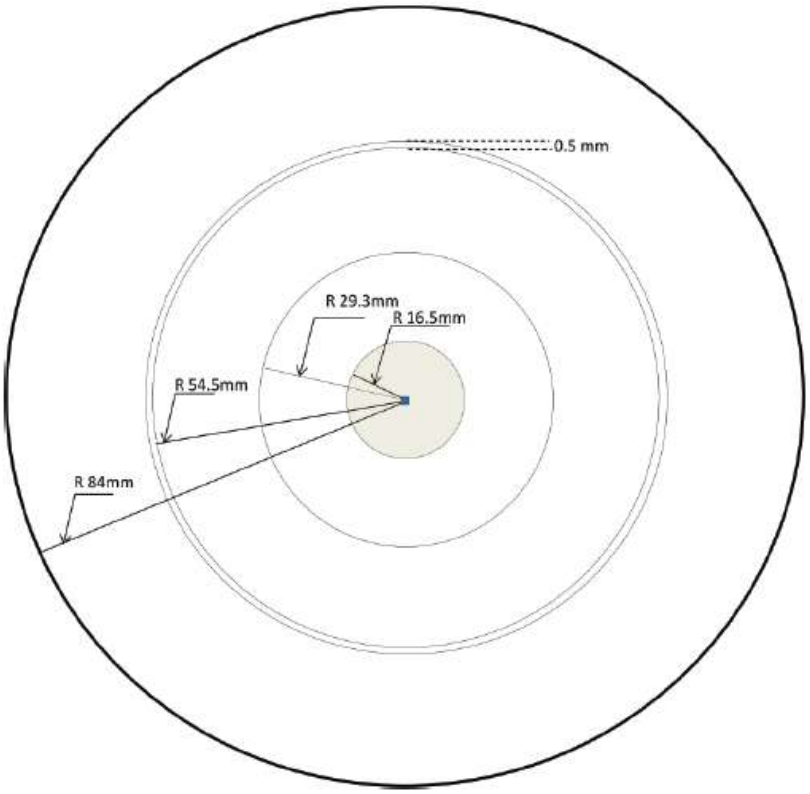


Figure (III-3): Dimensions du Stator et de Rotor

III.3: Présentation de l'outil de calcul numérique utilisé

III.3.1: Présentation du logiciel FLUX2D

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant de régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Le logiciel permet 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. La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés.

Module **Construction (Preflux)** Il contient trois fonctions :

(geometry & physics) ; permet de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier, de déterminer le type du problème (magnétostatique, magnétodynamique ou transitoire) et associer des matériaux et des propriétés (magnétiques et électriques) à chaque élément de la géométrie.

(**Circuit**) définit le schéma et les données du circuit électrique.

(**Materials database**) permet de choisir et de construire une banque de matériaux.

Ce module assure aussi le couplage entre le circuit magnétique et le circuit électrique d'alimentation.

 Module **Solving Process:**

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (**Direct**) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

 Module **Analysis:**

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc. [8]

Le circuit magnétique de la machine étudiée est représenté dans la figure (III-8)

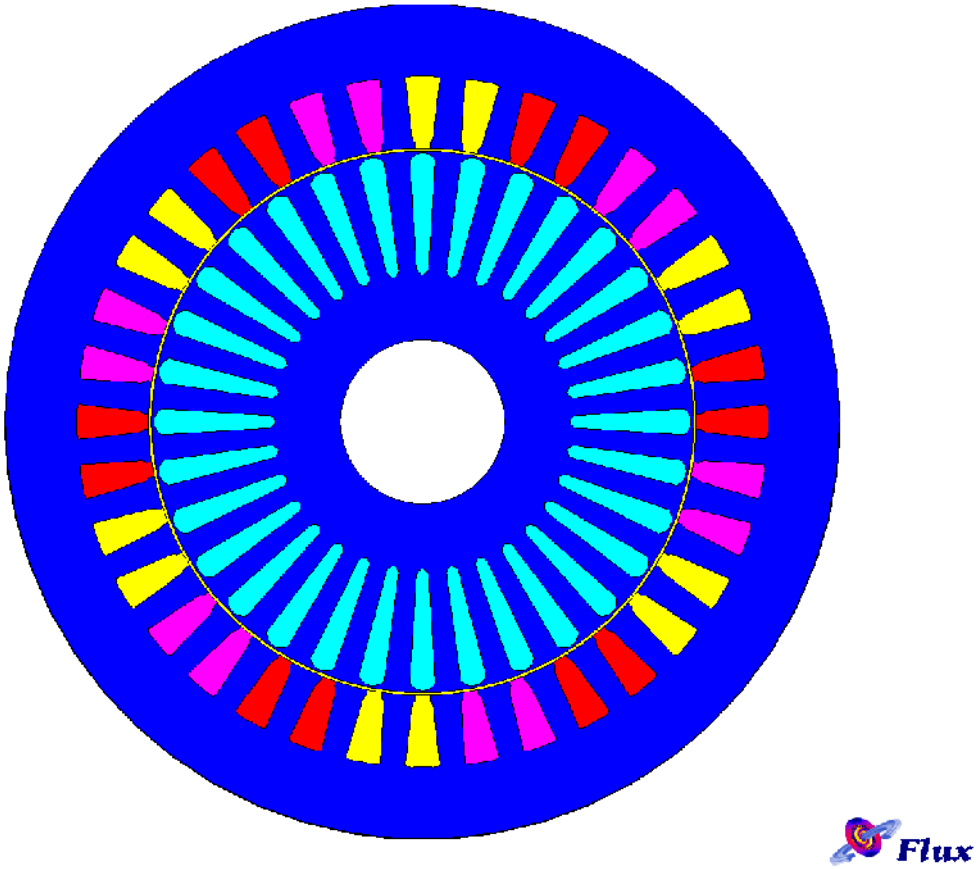


Figure (III-4): Circuit magnétique de la machine étudiée

III.3.2 Procédure de construction du modèle par FLUX2D:

Pratiquement, il suffit pour une machine saine de considérer un seul pôle grâce à la symétrie électrique et magnétique de la machine par rapport à son axe de rotation, mais ce n'est pas le cas pour une machine avec défaut où elle perd sa symétrie. Il faut donc réaliser la géométrie complète de la machine pour étudier son comportement avec défaut.

Pour simplifier la méthode de construction, on commence par faire entrer des paramètres et des systèmes de coordonnées pour le modèle puis schématiser la première encoche statorique et la première barre rotorique. Le reste de la géométrie et du maillage est créé par propagation.

Les paramètres à entrer représentent les dimensions des différentes parties de la machine, mais sont indépendants d'aucune unité de mesure. L'intérêt de ces paramètres est qu'ils simplifient l'entré du problème et les modifications dans la géométrie par définition des coordonnées des points en fonction de ces paramètres, par exemple, on définit le diamètre intérieur de stator comme (DIS) et si on veut le changer il suffit de changer son paramètre, Flux2D vas automatiquement mettre à jour les points et les lignes correspondants à ce paramètre et le maillage. Sans ce paramètre il faut redéfinir les coordonnées de chaque point et chaque ligne cités à cette distance ainsi que le maillage Lorsque on entre les points de l'encoche statorique et de celle rotorique et relie entre eux par des lignes et des arcs, les surfaces des régions sont automatiquement construits par ces lignes.

Puis on construit les deux lignes intérieure et extérieure du rotor et celle extérieure de stator [8].

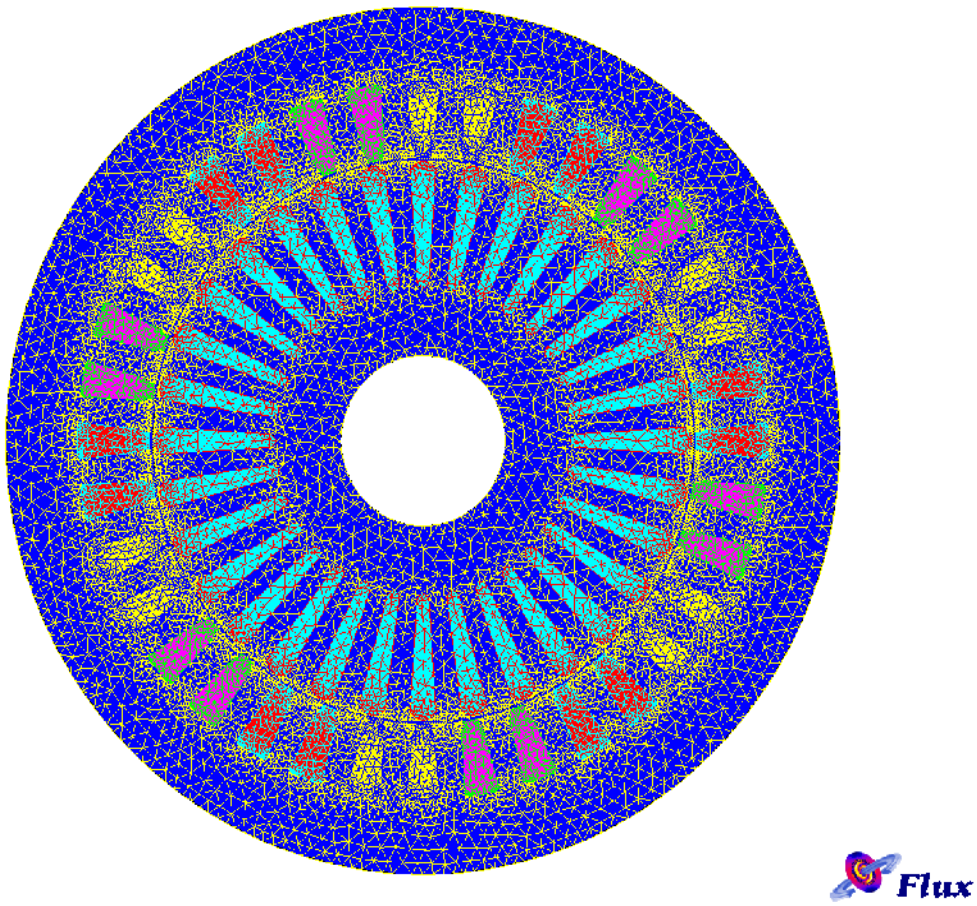
III.4:Génération du maillage:

Les éléments du découpage sont générés automatiquement par un générateur de maillagedans le module **Preflux**, mais le size du maillage peut être contrôlé par création des points et des lignes du maillage puis l'association de ces derniers aux points de la géométrie. Preflux donne l'avantage de propagation des surfaces et leur maillage au même temps.

Pour compléter la géométrie facilement on ajoute des transformations qui doublent rapidement les surfaces et les lignes : pour le rotor, la transformation est une rotation autour d'un point, définie par les coordonnées de ce point et l'angle de rotation. Dans notre cas le point est o (0,0), l'angle égal à 360/32. Pour le stator on définie une transformation du même type avec un angle égale à 360/36. On applique la première à la surface qui représente la barre rotorique 31 fois et la deuxième à la surface de l'encoche statorique 35fois avec le choix de commande **Add Faces and associated Linked Mesh Generator** pour doubler les surfaces avec la prise en compte de leur maillage. Il reste le diamètre intérieur de stator, pour le compléter on relie entre deux encoches par un arc puis double cet arc 35 fois en appliquant la même transformation de l'encoche statorique. Finalement on choit la commande **Build Faces** pour créer le reste des surfaces.

Jusqu'à l'ici le maillage n'est pas effectué, pour mailler la géométrie on choit la commande **Mesh lines** puis la commande **Mesh faces** et le maillage sera schématisé.

La figure II.8 représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.



Figure(III.5):Répartition du maillage

III.5:Création des matériaux:

Pour notre modèle on utilise trois types de matériaux : IRON (défini comme un matériau ferromagnétique non linéaire), l'Aluminium et l'air.

L'aluminium est défini comme un matériau linéaire par une résistivité et une perméabilité relative constante. Il n'est pas nécessaire d'ajouter d'autres propriétés (propriétés thermiques par exemple) parce qu'ils ne sont pas prises en compte pour notre cas (analyse magnétique).

Le matériau ferromagnétique IRON est caractérisé par la courbe d'aimantation B (H), qui est non linéaire, pour tenir en compte de la saturation du circuit magnétique

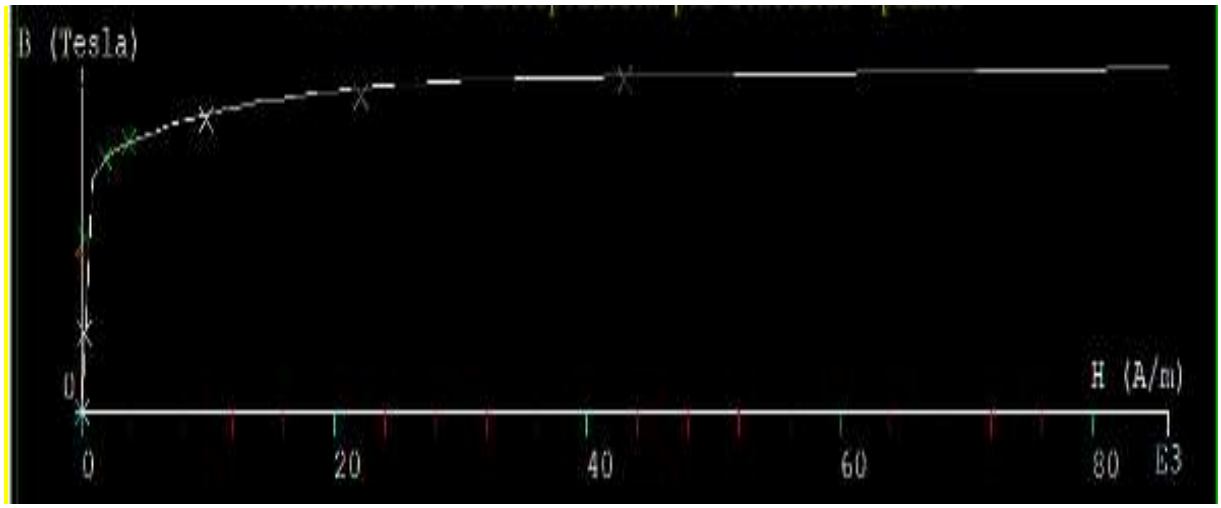


Figure (III.6): la courbe d'aimantation B (H) du matériau ferromagnétique

III.6:Le circuit électrique:

Pour bien représenter le circuit électrique de la machine il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court circuit), figure (III.7).

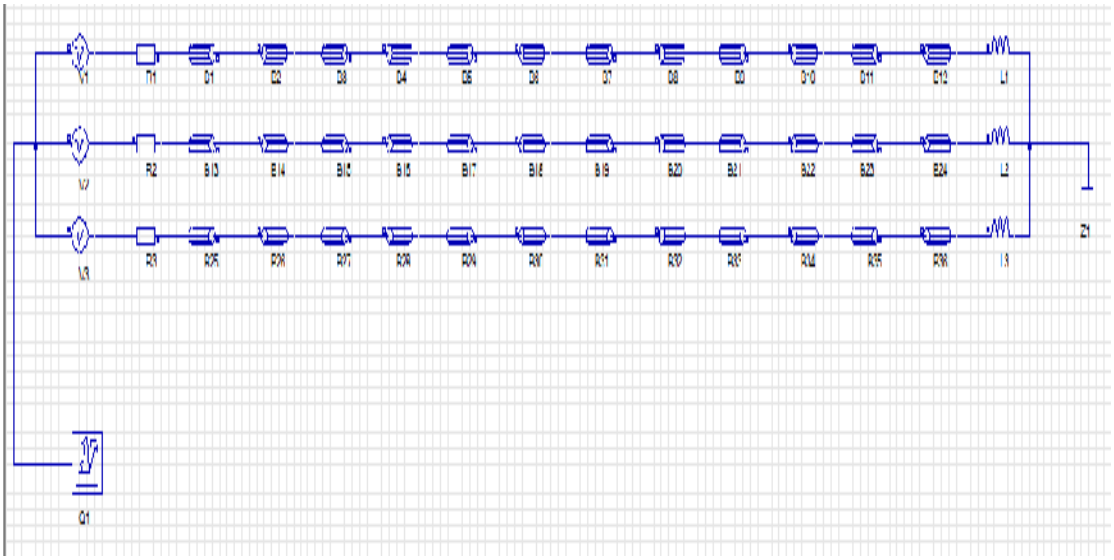


Figure (III-7): Circuit électrique

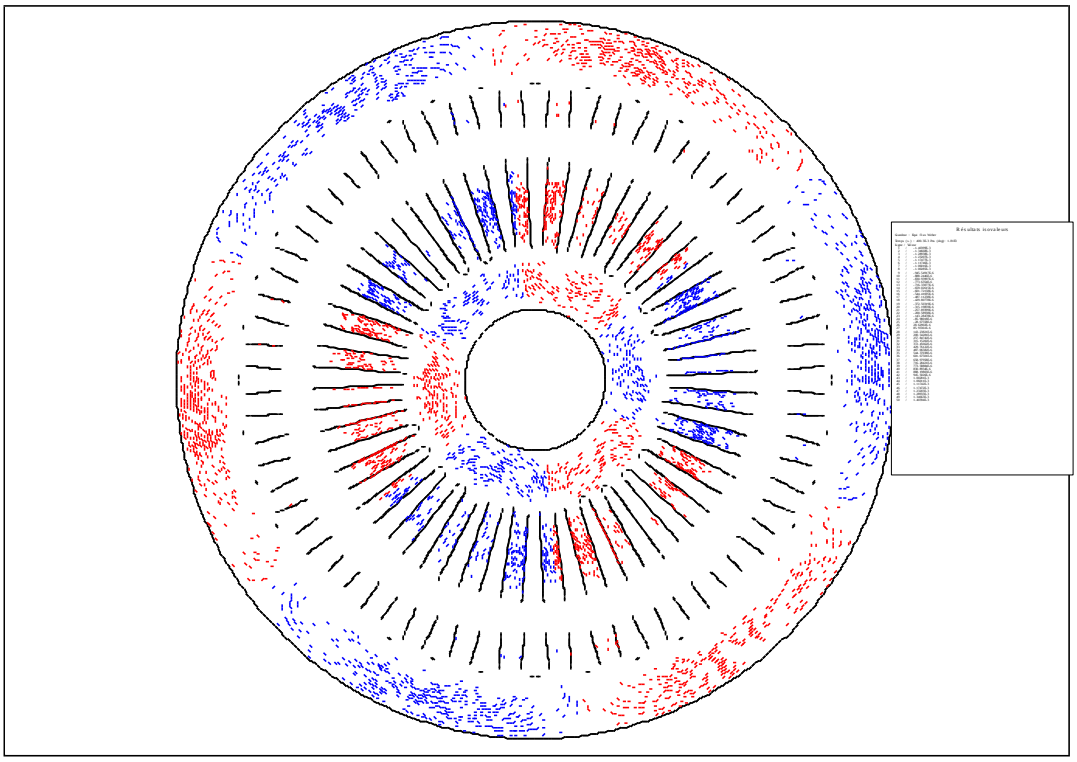
III.7:Exploitation du résultat:

Premièrement, on va présenter la simulation du régime transitoire électrique de la machine asynchrone.

Dans la suite, nous présentons l'analyse spectrale à l'aide de la transformée de Fourier rapide (FFT).

III.7.1:pour une machine saine:

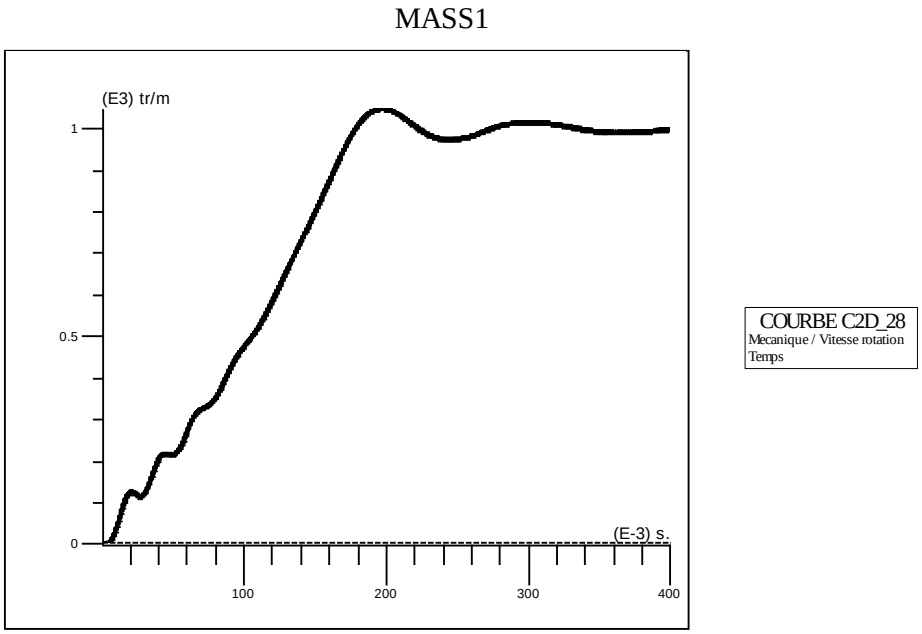
La figure (III.8) represente la distribution des lignes du champ



Figure(III.8): la distribution des lignes du champ

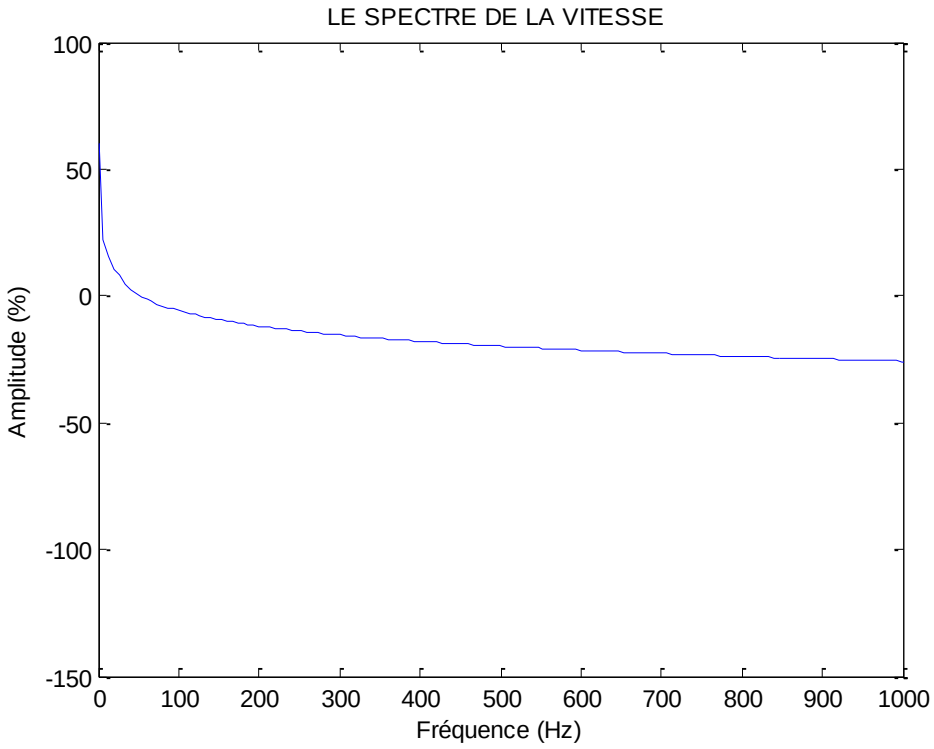
Les lignes équipotentielles sont représentées sur la **Figure (III.8)**, en fonctionnement à vide. Les lignes du champ magnétique dans la machine pénètrent profondément dans le rotor.

La figure(III.9): représente la vitesse de la machine saine



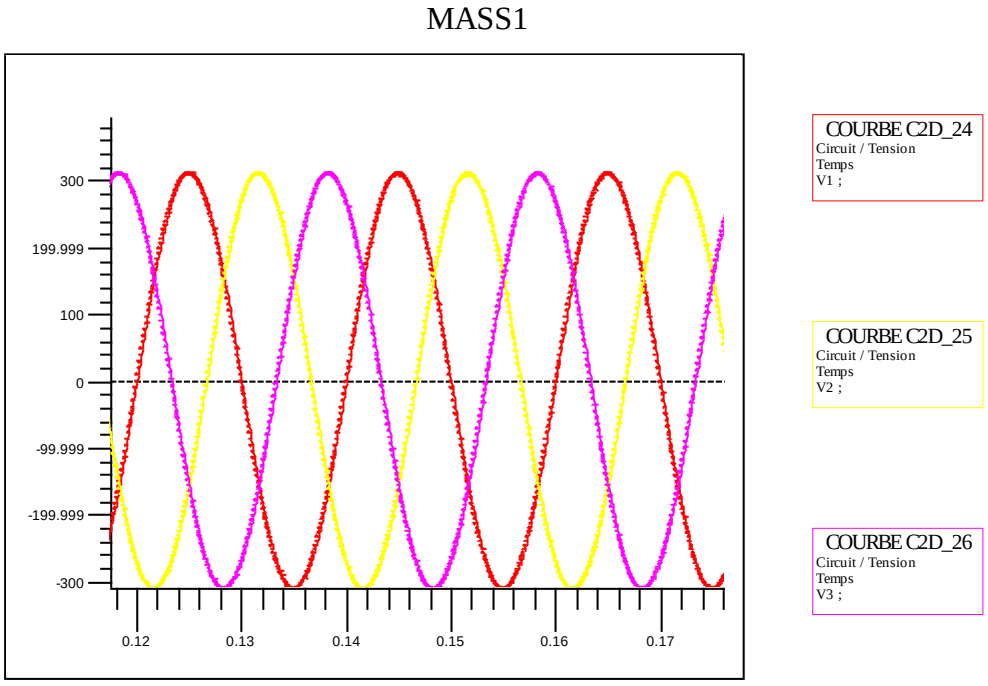
Figure(III.9): la courbe de vitesse

La figure(III.10): représente le spectre de vitesse



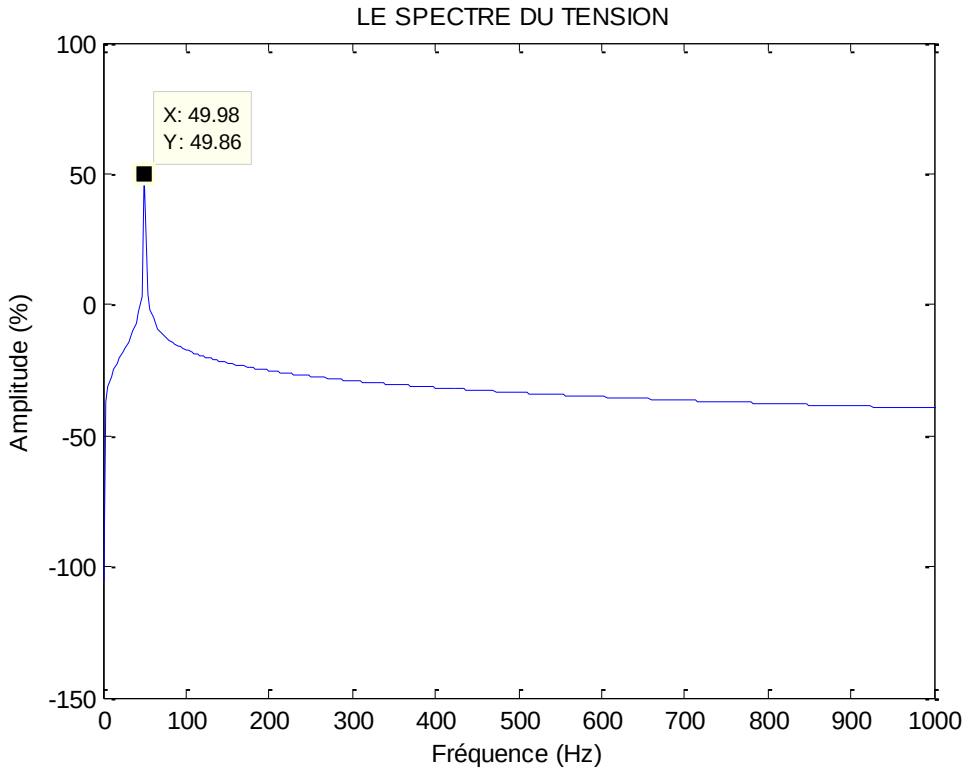
Figure(III.10): spectre de vitesse

La figure(III.11): représente la tension d'alimentation du 3phase



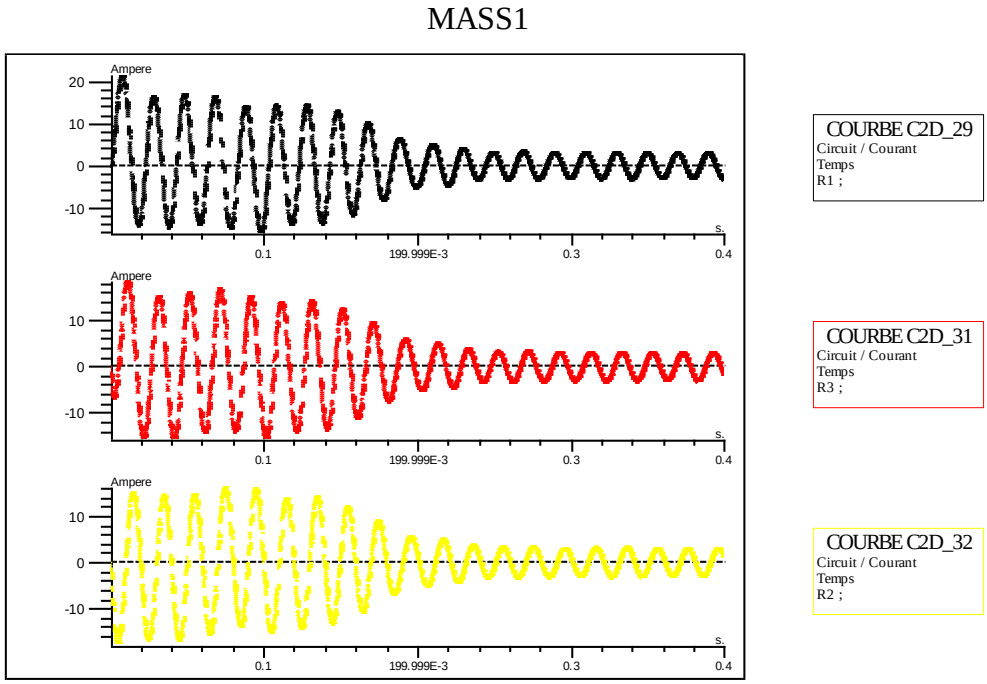
Figure(III.11): courbe de tension

La figure (III.12) représente le spectre du tension



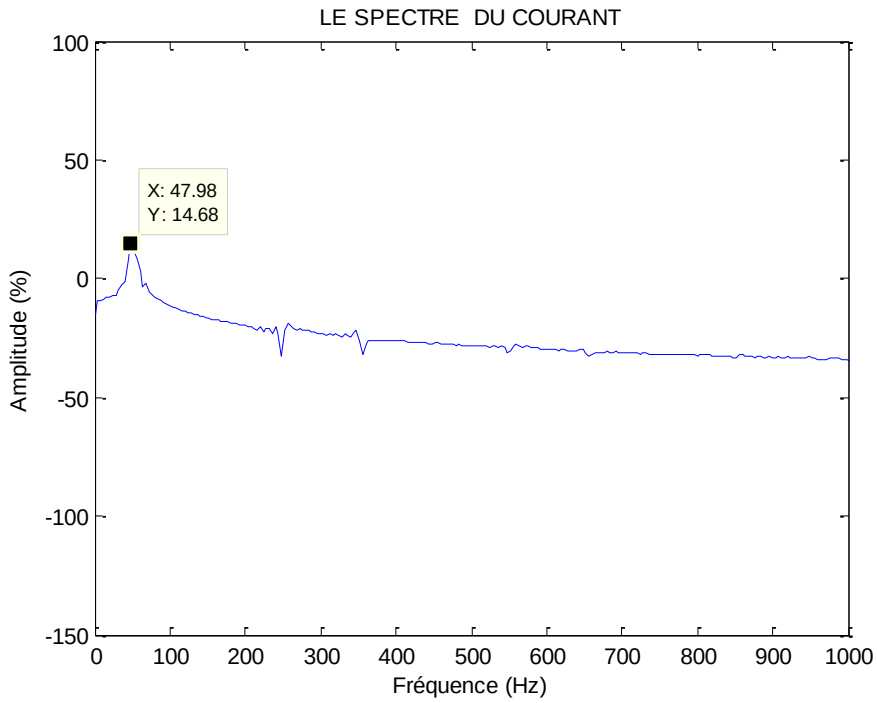
Figure(III.12) spectre de tension

La figure(III.13): représente les 3courant de phases



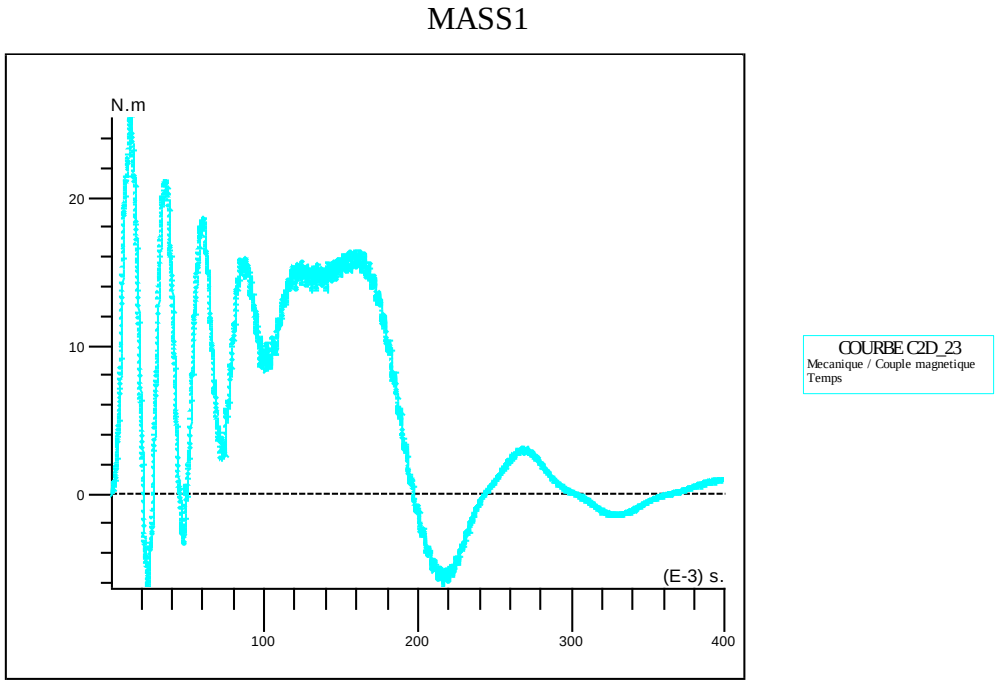
Figure(III.13): courbe de courant

La figure(III.14): représente le spectre du courant



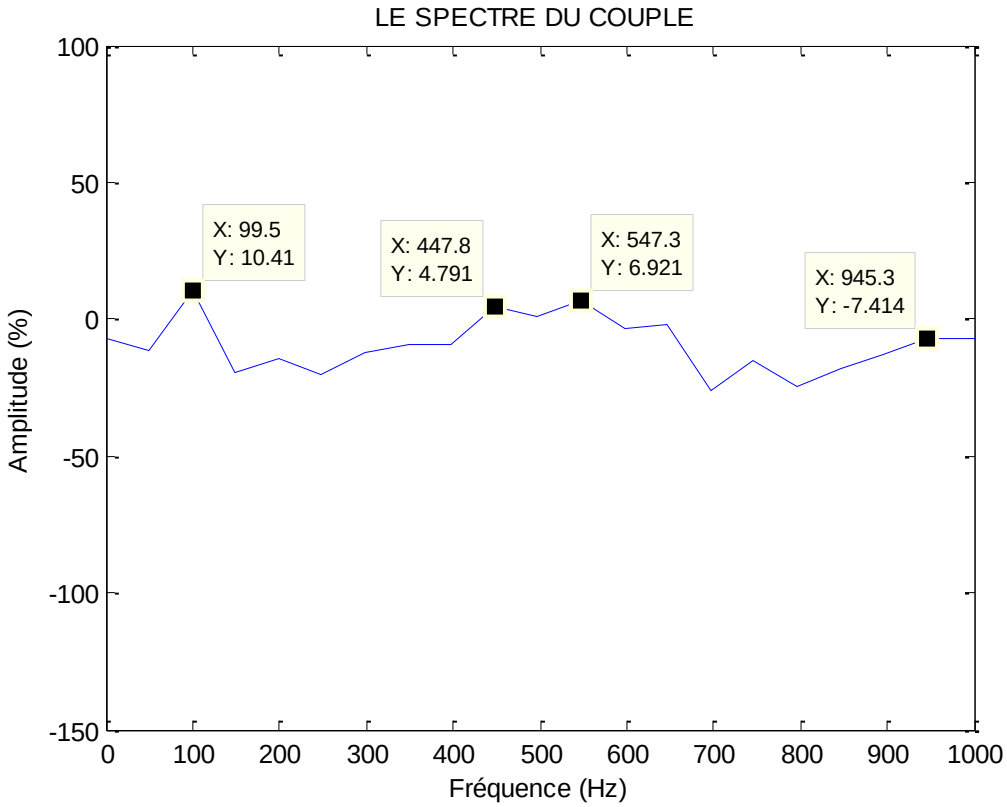
Figure(III.14): spectre du courant

La figure(III.15): représente le couple électromagnétique de la machine



Figure(III.15): courbe du couple

Lafigure(III.16): represente le spectre du couple



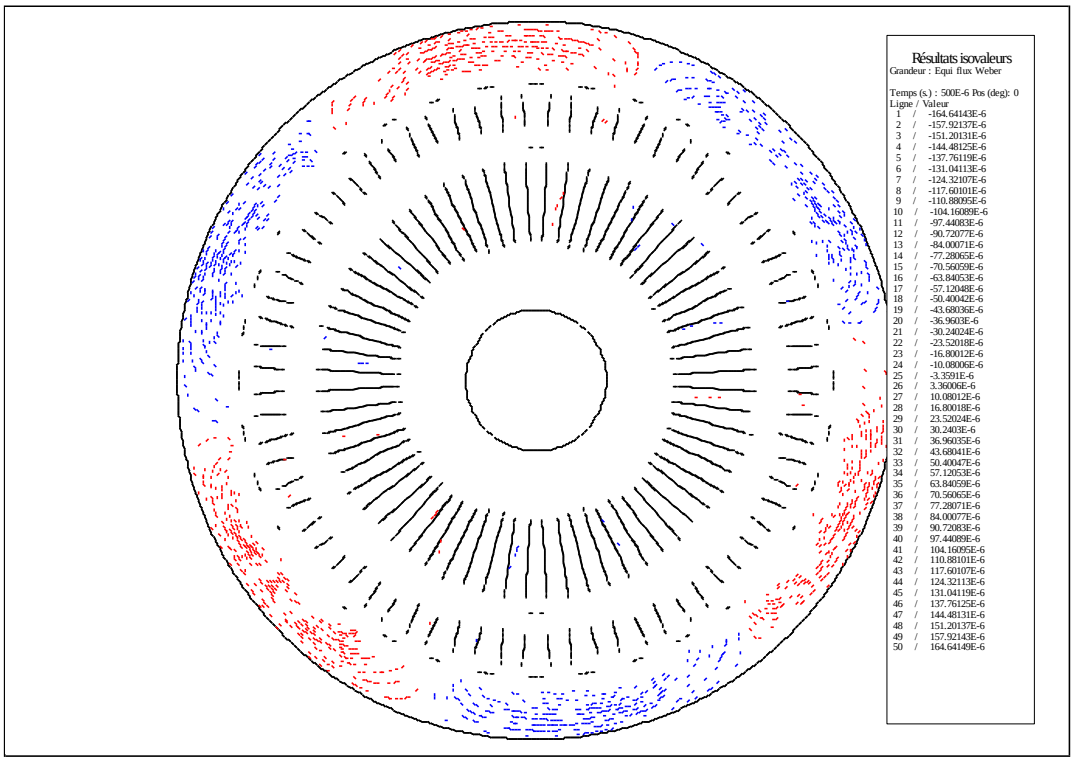
Figure(III.16): spectre du couple

La fig.(III.8-III.16) présente les grandeurs de la machine lorsqu'elle est alimentée directement par une source purement sinusoïdale. Elle illustre, la vitesse de rotation, le couple électromagnétique et les courants statoriques. Lors de cet essai, on note un démarrage à vide**,** Après un régime transitoire, la machine se magnétise, Les trois courants de phase sont bien déphasés entre eux de 120° électriques, donc, nous retrouvons bien le comportement équilibré de la machine, Le couple électromagnétique, à vide, est pratiquement nul. La vitesse atteint une valeur constante .

III.7.2:pour une machine défaillent:

III.7.2.1:cas d'un court circuit (entre spire) :

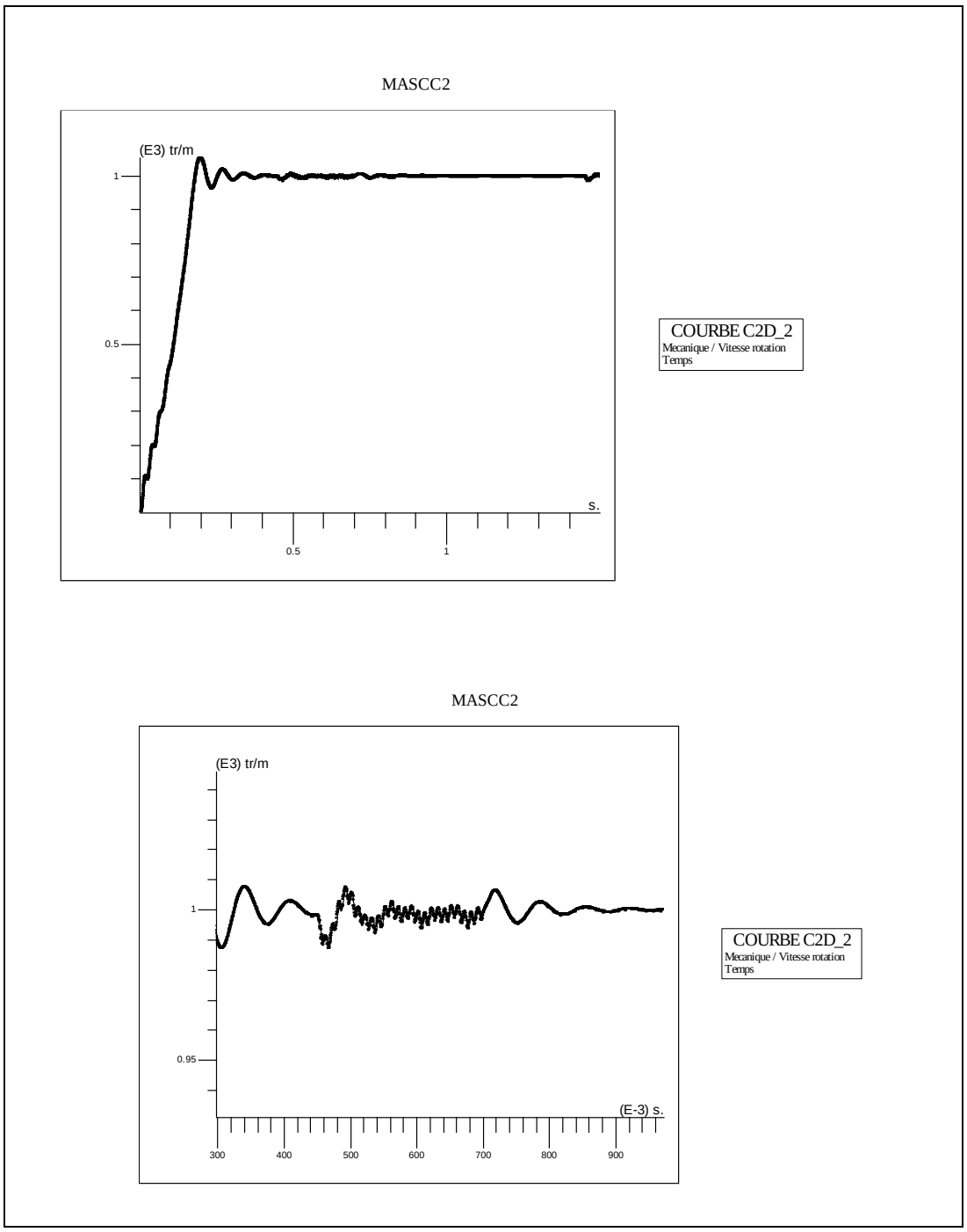
La figure(III.17): représente la distribution des lignes de champ



Figure(III.17): la distribution des lignes de champ

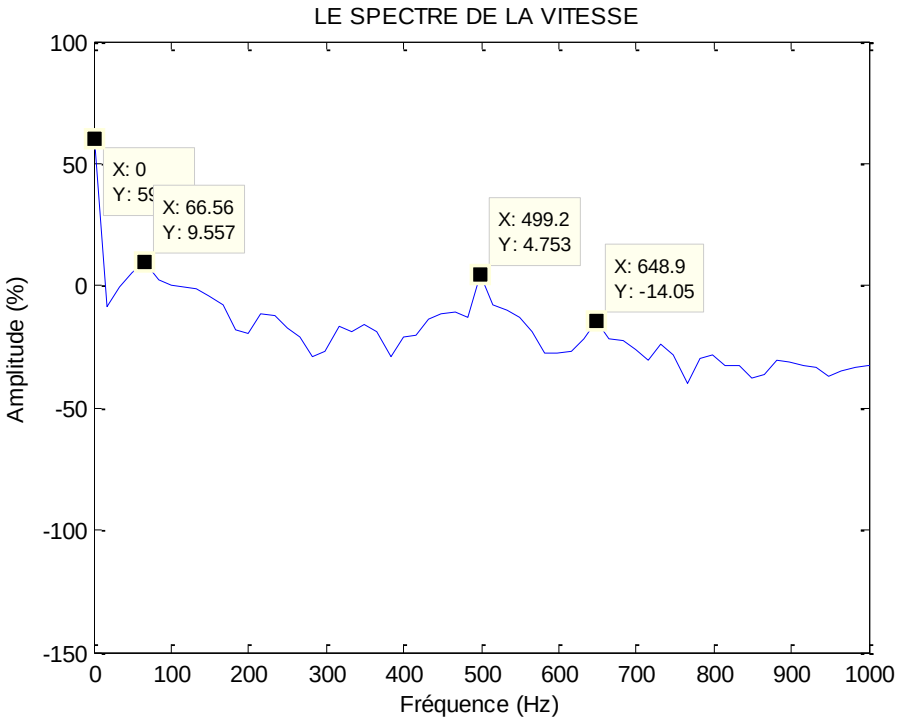
Les lignes de champ refoulées vers la surface extérieure du rotor

La figure (III.18): représente la vitesse de la machine défaillent



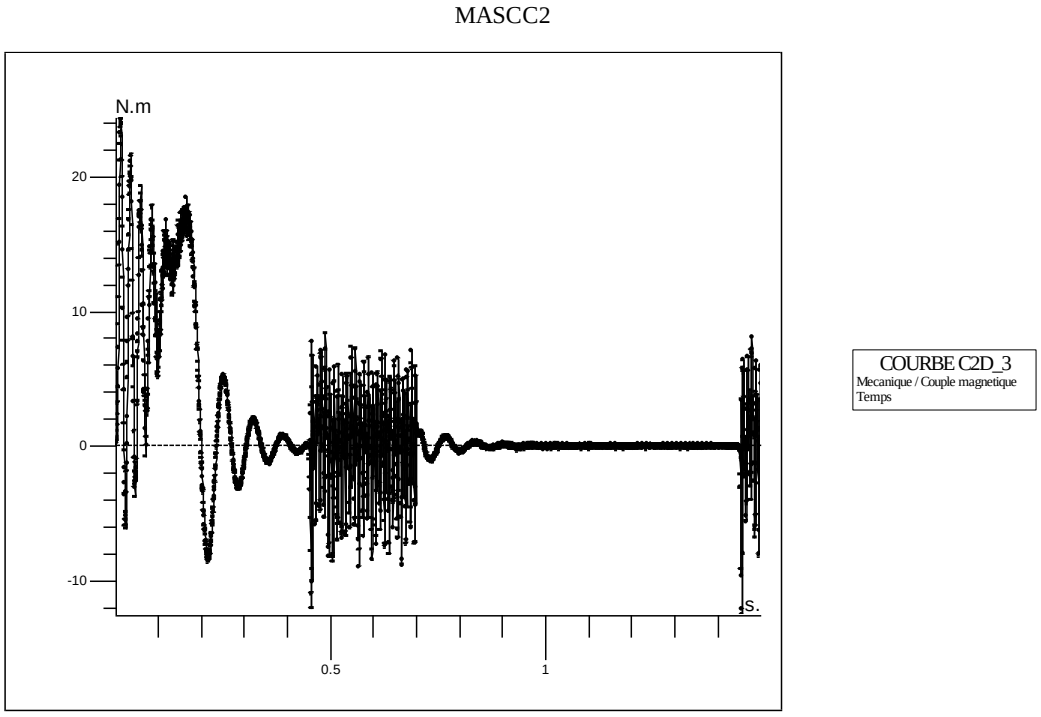
Figure(III.18): courbe de vitesse

La figure (III.19): représente le spectre de la vitesse



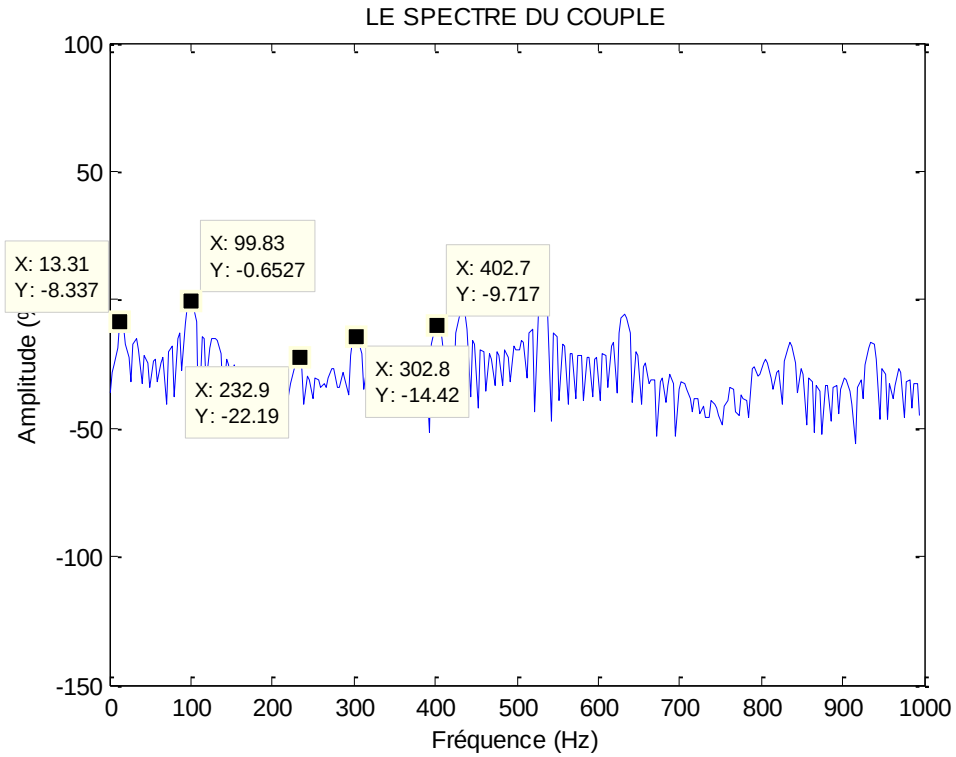
Figure(III.19): spectre de la vitesse

La figure(III.20): représente le couple électromagnétique



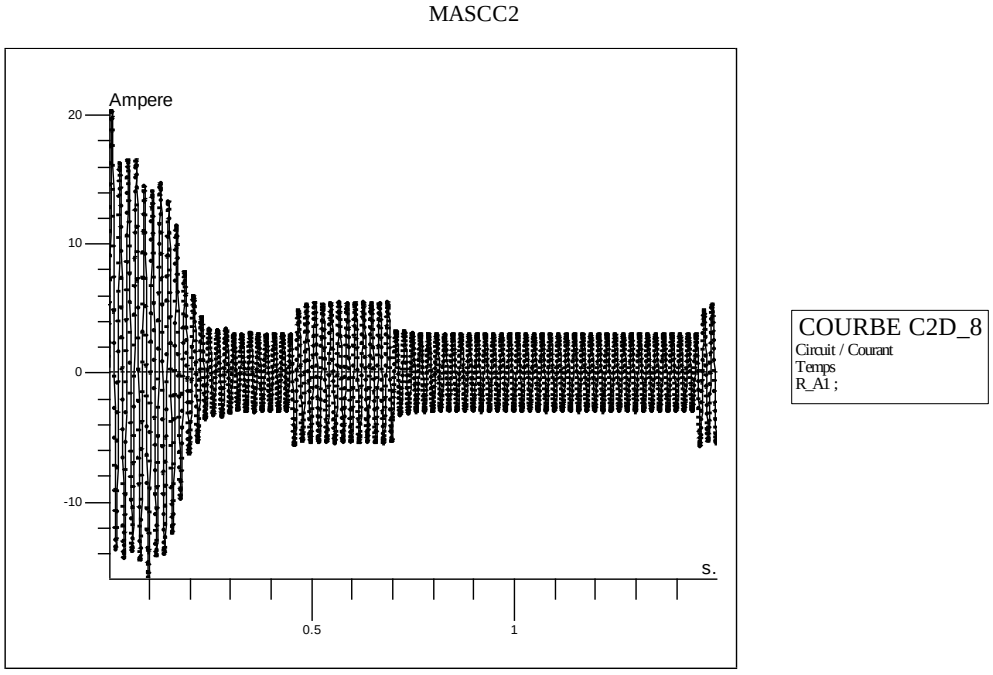
Figure(III.20): courbe de couple

La figure (III.21): représente le spectre du couple



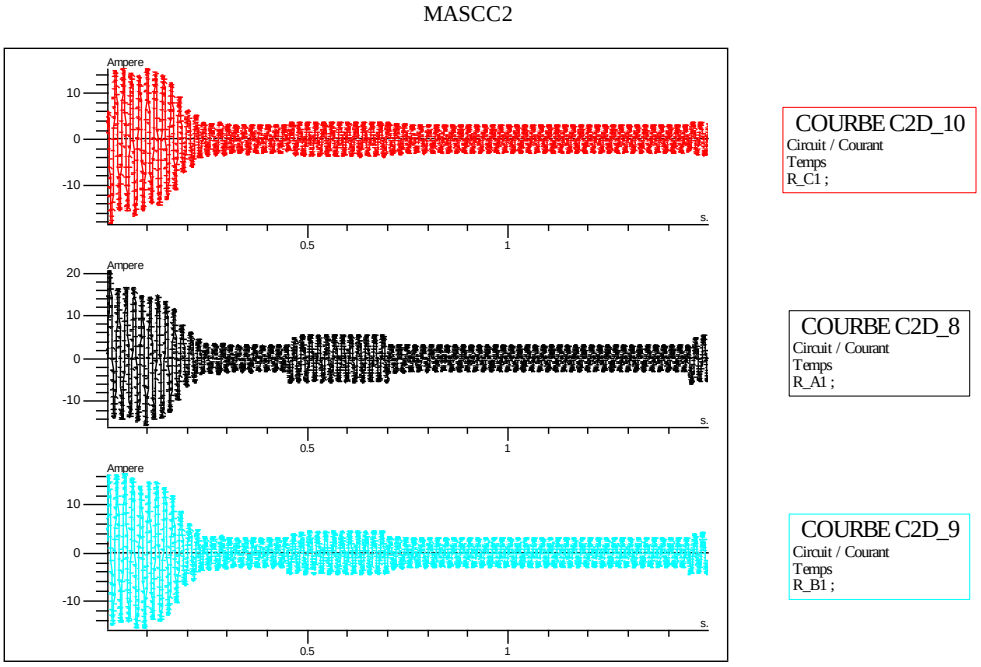
Figure(III.21): spectre du couple

La figure (III.22): représente le courant de la phase de défaut



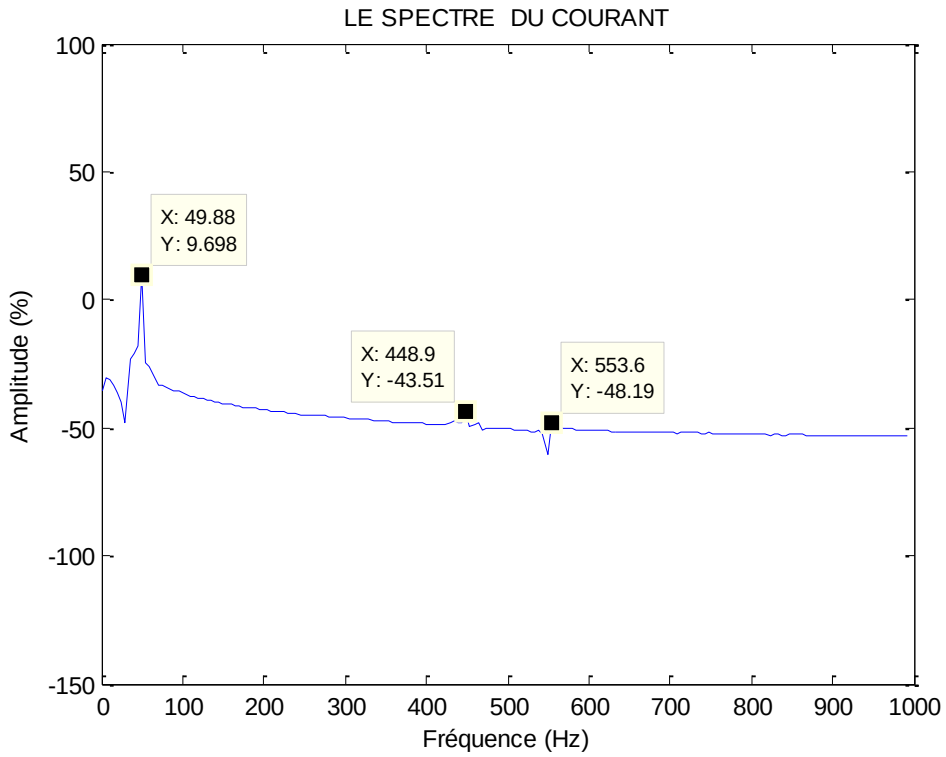
Figure(III.22): courbe du courant de phase A1

La figure(III.23): représente les courants des 3phases



Figure(III.23): courbe du courant des 3 phases

La figure(III.24): représente le spectre du courant



Figure(III.24): spectre du courant

La figure (III.23) montre les trois courants statoriques des phases de la machine lors d'un défaut de court-circuit entre spires de la phase statorique. L'augmentation des amplitudes des courants statoriques est un indice primaire de la présence de défaut qu'il faut caractériser selon sa signature. On remarque que ces amplitudes des courants ne sont pas égales, donc on peut dire que les courts circuits entre spires d'une phase statorique affectent de nature différente les autres phases.

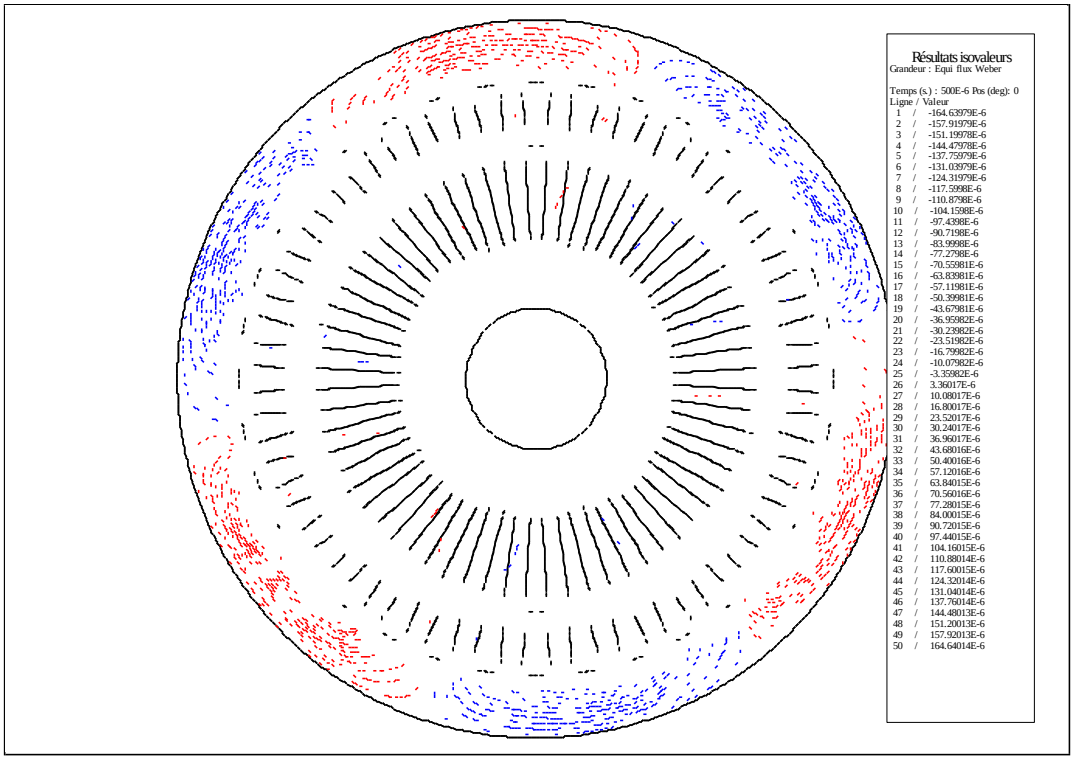
Dans la phase défectueuse le courant augmente jusqu'à certain valeur, La figure(III.24) présente le spectre des courants statoriques de la phase *A* pour court-circuit entre spire. On remarque que dans le cas d'un fonctionnement sain seul la fondamentale apparaît (voir). Ce résultat sera considéré comme référence. Dans le cas de présence de court circuit, on remarque l'apparition des fréquences caractéristiques des défauts d'ordre.

A la suit d'un court circuit, apparaissant des vibration et des oscillation de couple synonyme de présence de nouvelle composantes dans le couple électromagnétique, et par conséquence dans les courants statoriques.

Ces nouvelles composantes entrainent des harmoniques de fréquence dans le courant absorbé par la machine

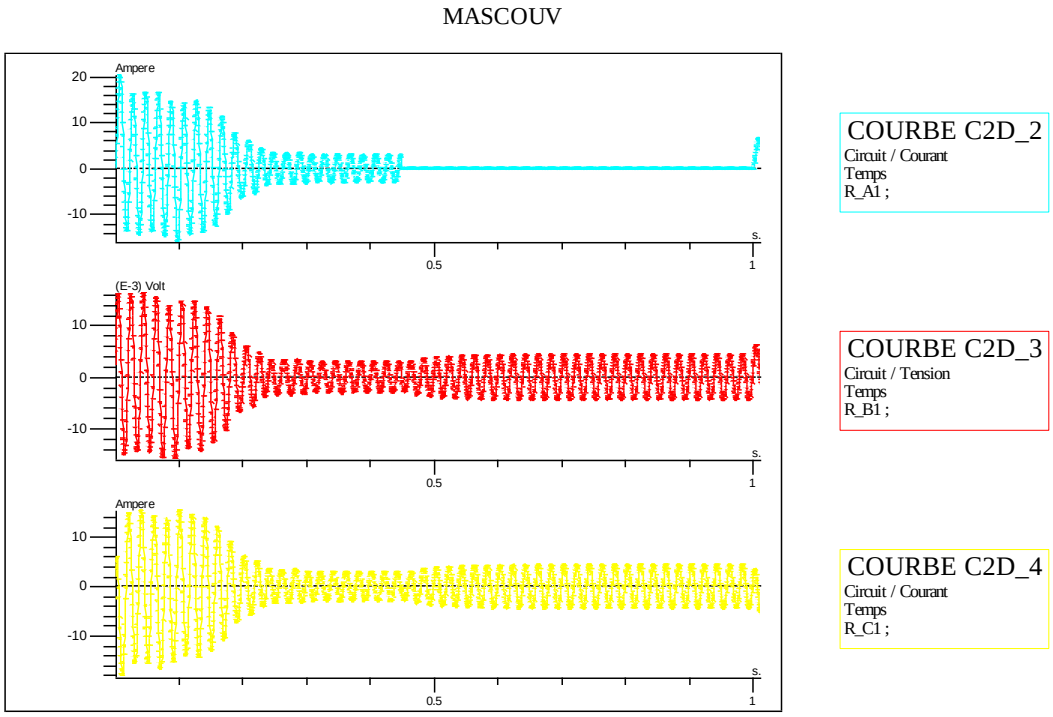
III.7.2.2:cas d'un circuit ouvert:

La figure (III.25): représente la distribution des lignes de champ



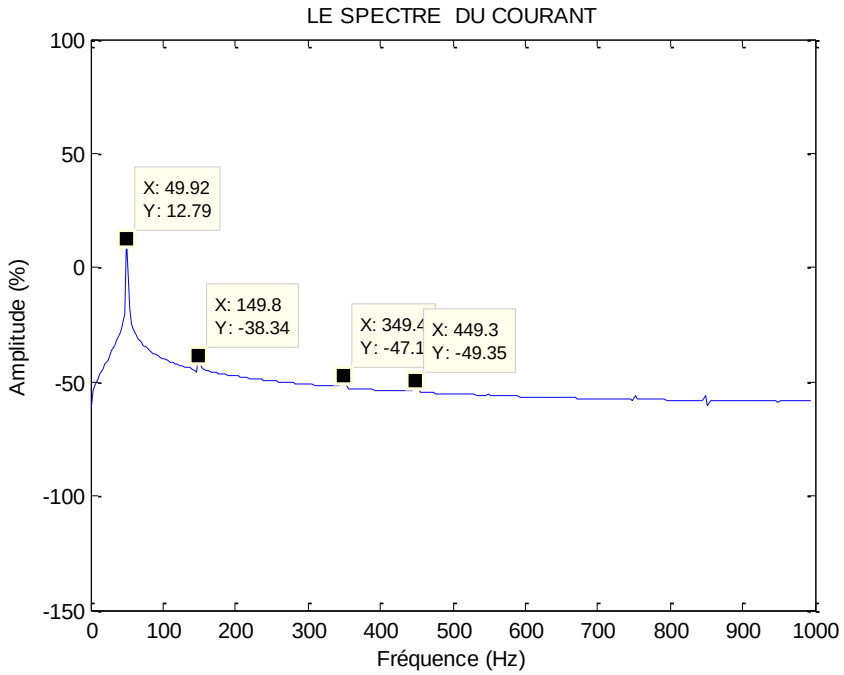
Figure(III.25): la distribution des lignes de champ

La figure (III.26): représente les 3 phases en cas de circuit ouvert à la phase A1



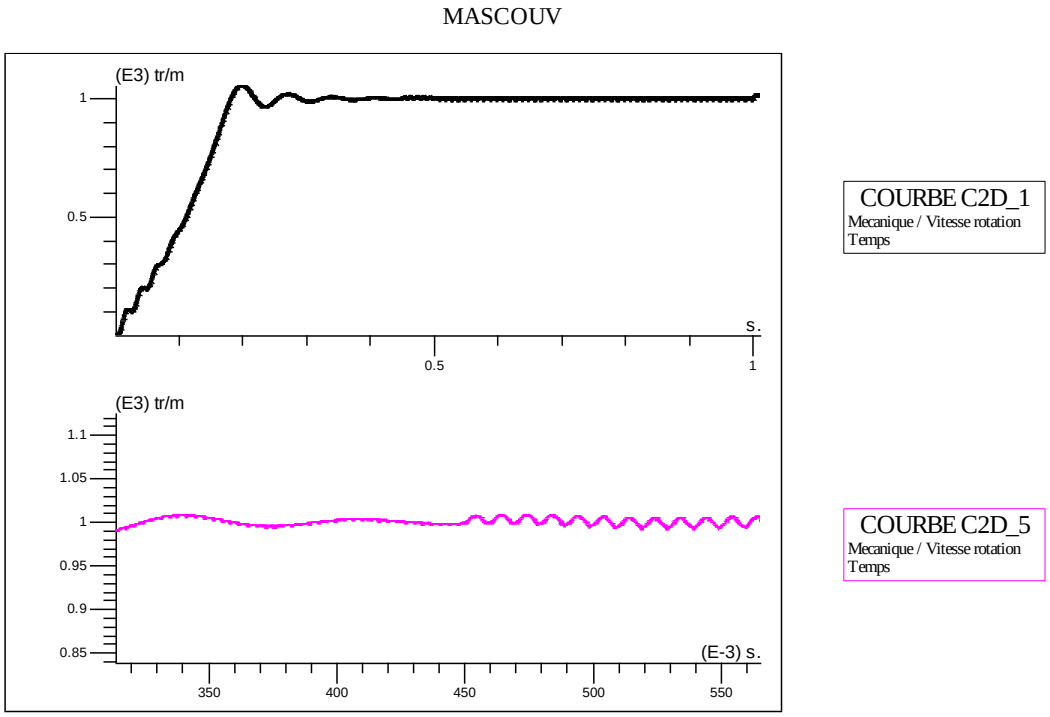
Figure(III.26): courbe du courant de 3phase

La figure(III.28): représente le spectre du courant



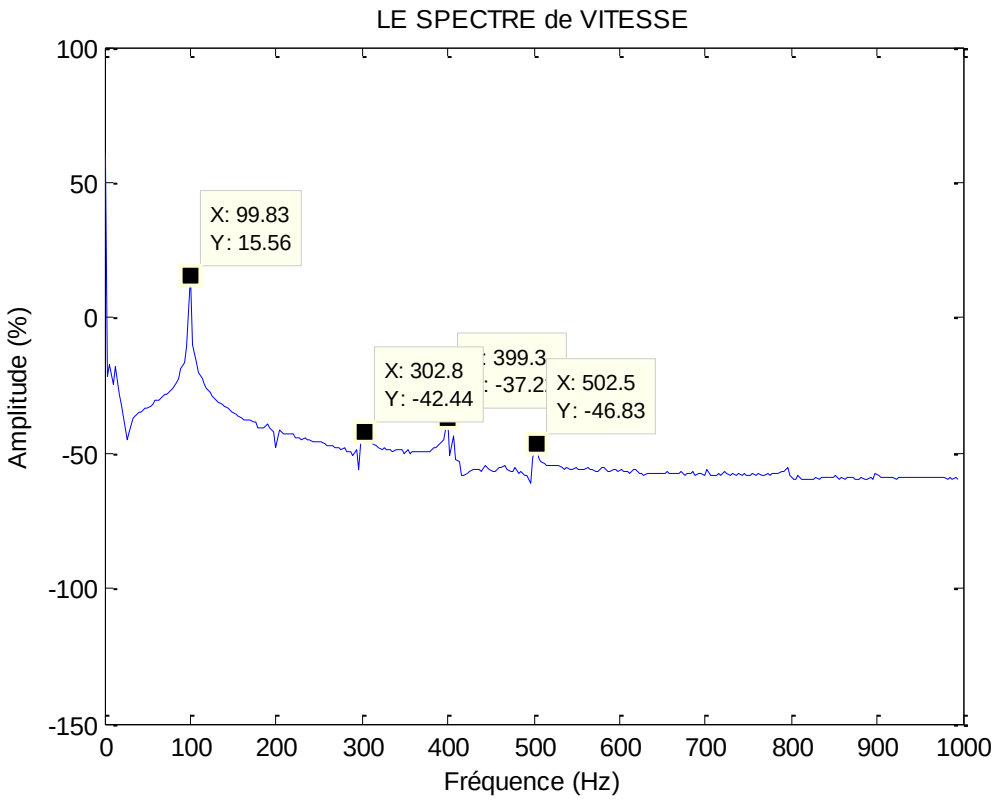
Figure(III.27): spectre du courant

La figure(III.28): représente la vitesse de la machine en cas de défaut (C . O)



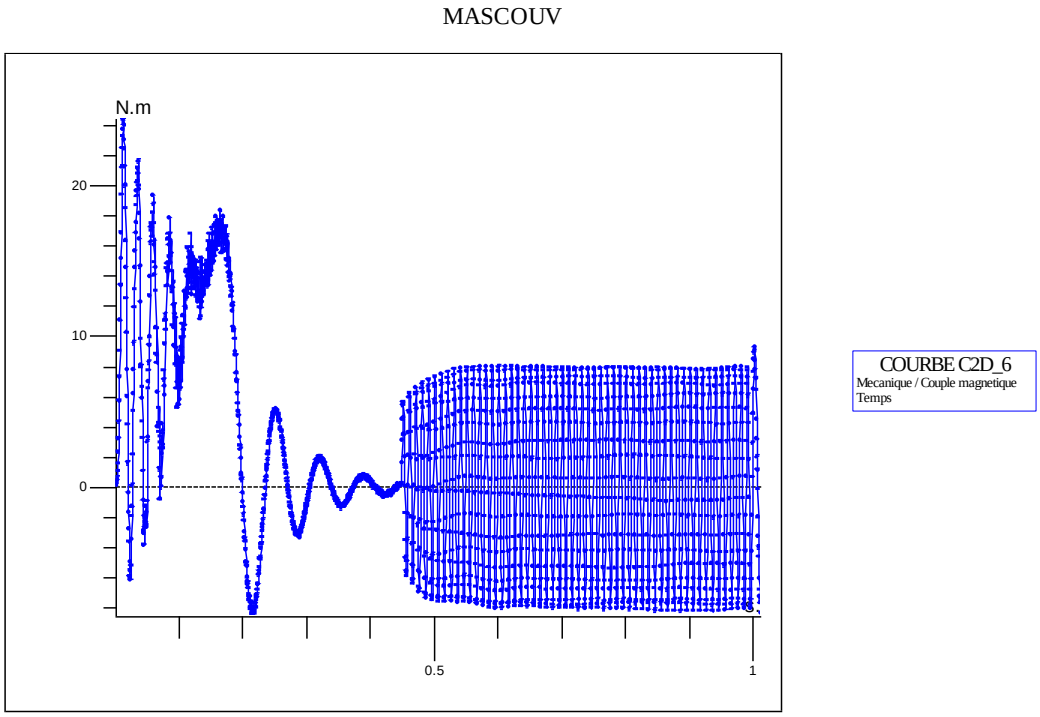
Figure(III.28): courbe de la vitesse

La figure(III.29): représente le spectre de vitesse



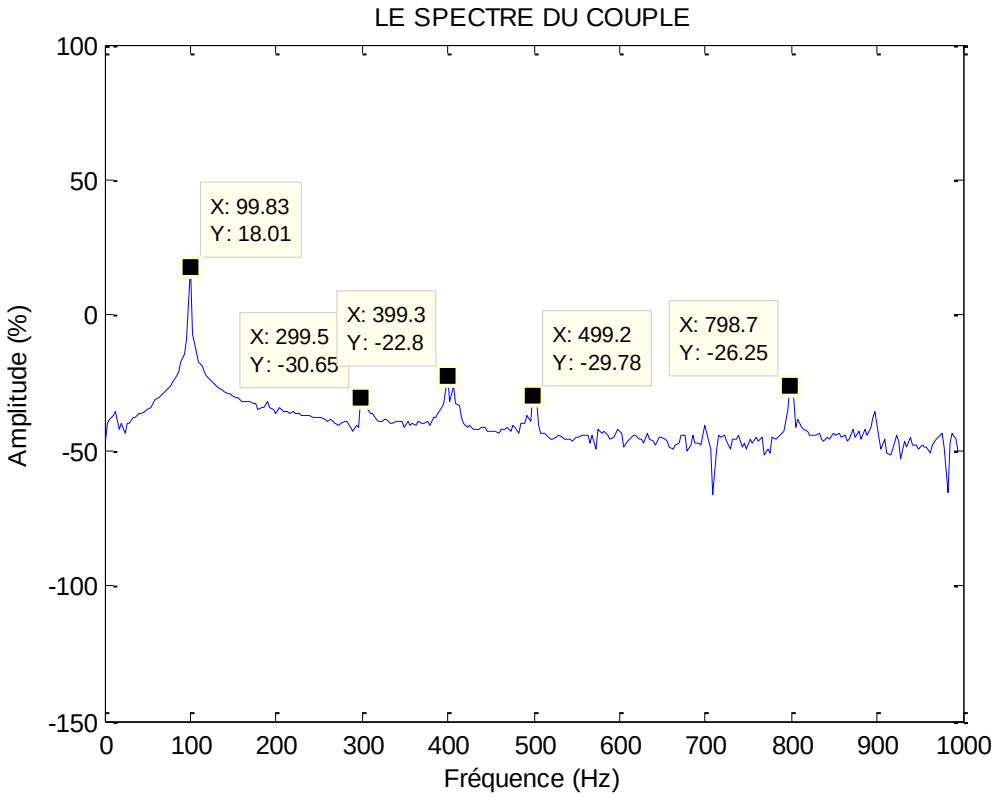
Figure(III.29): spectre de vitesse

La figure(III.30): représente le couple électromagnétique en cas de (C . O)



Figure(III.30): courbe du couple

La figure(III.31): represente le spectre du couple



Figure(III.31): spectre du couple

Le cas d'un circuit ouvert la vitesse diminue, le courant présente une déformation de la forme, nous avons simulé le cas ou une phase ouverte, le couple diminue. Ce défaut au niveau du couple présente une modulation dans la phase infecté et diminution de valeur.
L'analyse spectrale présente des harmoniques important, ce qui apparait un défaut.

Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation électromagnétique de la machine asynchrone à cage en utilisant la méthode des éléments finis. Cette méthode qui prend en considération les paramètres géométriques et physique de la machine permet de déterminer la distribution du champ magnétique dans toute la machine que ce soit dans le cas d'une machine saine ou en défaut [3].

Les défauts détectés fait apparaître des oscillations sur les courants, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique.
En effet, nous avons pu déterminer l'influence des défauts (court circuit/circuit ouvert) sur la distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer.

Enfin l'analyse présentée par la méthode des éléments finis montre que c'est une méthode efficace et peu coûteuse pour étudier l'influence des défauts sur le comportement des machines asynchrones, et nous a permet de comprendre et de quantifier les conséquences locales des défauts [4].

Conclusion Générale

La machine asynchrone est caractérisé par des équations électriques complexes, ou apparaissaient des paramètres dont la détermination s'avère difficile, l'impossibilité de voir le comportement et l'évoluti La machine asynchrone à cage est caractérisé par des équations électriques on des courants rotoriques en régime dynamique.

Pour cela nous avons présenté et développé une modélisation basée sur la résolution des équations de la machine asynchrone en termes de potentiel vecteur par éléments finis.
La vulgarisation et le développement de l'outil informatique sont parmi les raisons qui ont projeté les méthodes numériques au devant de la modélisation. L'une des méthodes utilisées à cette fin est la méthode des éléments finis. C'est une méthode puissante qui permet d'intégrer pratiquement tous les phénomènes inhérents au fonctionnement de ces machines tels le mouvement et la saturation.

Le travail qui nous a été assigné dans ce mémoire est la conception d'une machine asynchrone tout en étudiant ces performances en état sain et avec défaut.
Nous avons commencé par un logiciel FLUX2D, de mise en œuvre de la méthode des éléments finis pour la résolution du problème électromagnétique.
L'équation qui régie le fonctionnement de notre machine a été formulée a partir des équations de Maxwell pour aboutir a une équation différentielle aux dérivées partielles, qu'on a résolut numériquement par la méthode des éléments finis triangulaires, pour avoir comme solution une répartition du potentiel vecteur magnétique et les différentes grandeurs qui peuvent être dérivés directement de celui-ci (c'est-à-dire l'induction magnétique et les performances électromagnétiques) sur l'ensemble de notre domaine d'étude.

Dans ce mémoire, nous avons étudié la machine asynchrone dans le cas de fonctionnement : à vide, à cas d'une machine saine (sans défaut) et avec défauts (Court Circuit) et (Circuit Ouvert).

L'étude de diagnostic entamée au troisième chapitre, nous a permit de connaitre l'influence de certains paramètres comme, le défaut de court circuit et circuit ouvert sur la distribution de l'induction dans l'entrefer, le couple électromagnétique.

Bibliographies

[01] : OUADAH M'hamed (Modélisation et Diagnostic des Défauts des Machines Asynchrones à Cage D'écureuil par L'approche des Circuits Multiples Couplés Magnétiquement en Tenant Compte des Harmoniques D'espace), Mémoire de magister, à l'École Nationale Polytechnique d'Alger-2008.

[02] :(Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic) Mémoire de magister, à l'Université Mentouri Constantine_ 2007.

[03]: Mr. HAMADOU Adil Mr. NESSISSEN Abdelkader (Modélisation numérique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil); Mémoire du Master En « Génie électrique », Promotion : 2015-Université Djilali BOUNAAMA - Khemis Miliana.

[04]: MEDOUED AMMAR (surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones), Thèse de doctorat de l'université du 20 Août 1955-Skikda_2012.

[05]:Rouaibia redah (détection et diagnostic des défauts des moteurs asynchrone),mémoire de magister, à l'université de badji mokhtar Annaba-2009.

[06]: Abla Bouguerne (Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones), Mémoire de magister, à l'Université Mentouri Constantine_ 2009.

[07] Mr. Babak VASEGHI « contribution a l'étude des machines électriques en présence de défaut hentre-spires », Thèse doctorat de l'institut national polytechnique de lorraine, le 3 décembre 2009.

[08] Mme. KHelif Samia « Modélisation des machines asynchrone en vue du diagnostic prise en compte adéquate du circuit magnétique », Thèse magister en électrotechnique de l'université Mohamed khider- Biskra 2012.

[09] Mr. OUAZIR YOUCEF « calcul par éléments finis et réalisation expérimentale d'une machine asynchrone à cage », Thèse master de l'université des sciences et de technologie houari Boumediene, juin 2010.

[10] J, C SABOUNNADIERE «La méthode des éléments finis » éditions Hermes 1986.

[11] L, MOKRANI « L'analyse des champs électromagnétiques dans le moteur linaire a simple induction des éléments finis » Proeedings of the SMSES '97, Saida 13th and MAY 1997.

[12] K, ALITOUCHE « contribution a l'optimisation du couple d'un machine a aimants permanents en utilisant la méthode des éléments finis », Thèse de magister de I,N,P 1992.

[13]: Mr. AINOUCHE TOUFIK Mr. BOURAHLA MOHAMED AMINE Calcul par éléments finis et réalisation expérimentale d'une machine asynchrone à cage double étoile. à:l'USTHB-2010.

[14]: Preflux2D 9.2Induction Machine Constructing the Model Copyright © 2006 Magsoft Corporation.

[15]: Preflux2D 9.2 Induction Machine Calculations in Flux2D Copyright 2006 Magsoft Corporation