

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة

Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك

Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Machines électriques

Présenté par

Bendoumia mouhamed

&

Lakrid saddik

Diagnostic des défauts d'une machine asynchrone a cage en défaut de Court-circuit entre spire

Promoteur : **Mr. HACHELAF REDOUANE**

Année Universitaire 2019-2020

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 Mr. HACHELAF REDOUANE ainsi que Dr. KOUCHIH pour leur dévouement, leurs conseils et leur soutien moral tout le long de l'élaboration de ce travail.

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

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre 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

Résumé

L'intérêt grandissant des industriels pour la maintenance prédictive des entraînements électriques justifie le développement actuel de recherches interdisciplinaires. C'est dans ce cadre que nous nous intéressons au diagnostic des machines asynchrones.

Notre travail s'articule autour de la modélisation de la machine, à deux niveaux distincts. D'une part, les besoins spécifiques au diagnostic nécessitent la conception de nouveaux outils pour la simulation de la machine avec défaut.

Nous proposons un modèle de simulation adapté, fondé sur la méthode des éléments finis à l'aide de cette méthode. Nous avons fait la simulation des performances de la machine (le couple, la vitesse de rotation, le courant statorique ...) à l'état sain puis avec défaut de court-circuit entre spire.

Pour la diagnostique nous allons choisir une procédure de détection des défauts dans la machine asynchrone, basée sur l'analyse spectrale du courant statorique (FFT).

ملخص

يبرر الاهتمام المتزايد للمصنعين بالصيانة التنبؤية للمحركات الكهربائية التطور الحالي للبحوث متعددة التخصصات. في هذا السياق نهتم بتشخيص الآلات غير المتزامنة.

يدور عملنا حول النمذجة الآلية، على مستويين متميزين. من ناحية أخرى، تتطلب الاحتياجات التشخيصية المحددة تصميم أدوات جديدة لمحاكاة الآلة المعيبة.

نقترح نموذج محاكاة مكيف، بناءً على طريقة العناصر المحدودة باستخدام هذه الطريقة، قمنا بمحاكاة أداء الآلة (عزم الدوران، سرعة الدوران، تيار الجزء الثابت، إلخ) في الحالة ثم مع عطل دائرة قصيرة كهربائية بين لفات الوشعة بالنسبة للتشخيص، سنختار إجراء كشف الأعطال في الجهاز غير المتزامن، بناءً على التحليل الطيفي لتيار الجزء الثابت (FFT).

Abstract:

The growing interest of manufacturers in the predictive maintenance of electrical drives justifies the current development of interdisciplinary research. It is in this context that we are interested in the diagnosis of asynchronous machines.

Our work revolves around machine modeling, at two distinct levels. On the one hand, the specific diagnostic needs require the design of new tools for the simulation of the faulty machine.

We propose an adapted simulation model, based on the finite element method using this method. We simulated the performance of the machine (torque, speed of rotation, stator current, etc.) at the state sound then with short-circuit fault between turns.

for the diagnosis we will choose a fault detection procedure in the asynchronous machine, based on the spectral analysis of the stator current (FFT).

finite elements; Fast Fourier Transform; short-circuit fault

Table des matières

Table des matières.....	A
Table des figures.....	D
Listes des tableaux.....	F
Notations et symboles.....	G
Introduction générale.....	1

CHAPITRE 1 : Généralité sur les machines asynchrones

1.1 Introduction.....	2
1.2 Classification de machines électriques tournantes.....	2
1.3 Constitution de la machine asynchrone	3
1.3.1 Le stator.....	4
1.3.2 Le rotor.....	4
1.3.3 L'entrefer.....	5
1.3.4 Les organes mécaniques.....	5
1.4 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone	5
1.5 Bilan des puissances	7
1.6 Plaque signalétique	7
1.7 Le bobinage d'un moteur asynchrone	8
1.8 Plaque à bornes.....	8
1.8.1 Branchement étoile ou triangle	9
1.9 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone	11
1.9.1 Avantages.....	11

1.9.2 Inconvénients	12
1.10. ETUDE DES DIFFERENTS DEFAUTS DANS LES MACHINES ASYNCHRONE	12
1.10.1. Définitions et concepts.....	13
1.10.2. Causes des défauts	13
1.10.2.1. Cause des défauts au statorique	14
1.10.2.2. Cause des défauts au rotoriques.....	14
1.10.3. Etude Statistique.....	14
1.11. Les différents défauts de la machine asynchrone.....	16
1.11.1. Défauts statoriques.....	16
1.11.1.1. Défaut d'isolant dans un enroulement	17
1.11.1.2. Court-circuit entre spires	18
1.11.1.3. Court-circuit entre phases	19
1.11.2. Défauts rotoriques	19
1.11.2.1. Ruptures de barre	20
1.11.2.2. Ruptures d'anneaux.....	20
1.11.2.3. Excentricité statique, dynamique et mixte	21
1.11.2.4. Roulement à billes.....	21
1.11.3. Autres défaillances.....	23
1.11.4. Défauts extérieurs (d'environnement)	23
1.12. Surveillance des machines électriques.....	23
1.12.1. Des grandeurs mesurables et des signaux de défaut.....	23
1.12.3. Analyse spectrale	24
1.13. Conclusion.....	25

CHAPITRE 2 : modélisation de la machine asynchrone

2.1. Introduction.....	26
2.2. Modélisation de la machine asynchrone.....	26
2.2.1. Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC)	27
2.2.5. Méthode des éléments finis.....	28
2.2.5.1. Différences finies	29
2.2.5.2. Eléments finis	29
2.3. Condition aux limites	30
2.3.1. Condition dirichlet	30
2.3.2. Condition de neumann.....	30
2.4. Méthode des éléments finis	31
2.5. Le modèle employé.....	33
2.5.1. Le mode magnétostatique.....	33
2.5.2. Le mode magnétodynamique	34
2.5.3. Le mode magnétique transitoire	34
2.6. Principe de la méthode des éléments finis	34
2.7. Types d'éléments finis	35
2.8. Discrétisation et approximation	36
2.9. Les avantages et les inconvénients de la méthode éléments finis.....	36
2.9.1. Avantages de la méthode des éléments finis.....	37
2.9.2. Inconvénients de la méthode des éléments finis.....	37
2.10. Logiciel de résolution.....	37
2.11. Structure du FLUX 2D.....	37

2.11.1. Construction.....	38
2.11.2. Module Solving Process	38
2.11.3. Module Analysis.....	38
2.13. Enchaînement de base dans FLUX2D.....	38
2.14. Conclusion	40

CHAPITRE 3 : simulations de la machine asynchrone

3.1 Introduction.....	41
3.2 Application à la simulation de la machine asynchrone	41
3.3. Les données de la machine étudiée.....	42
3.4 Procédure de construction du modèle par FLUX2D	43
3.4.1 Génération du maillage	43
3.4.2 Géométrie	43
3.5Couplage avec les équations de circuit	44
3.6. Les matériaux magnétiques	45
3.7 Les propriétés physiques et régions	46
3.8 Caractéristiques de simulation	47
3.9 Simulation des comportements de la MAS	47
3.9.1Etat sain de la MAS	47
3.9.1.1 sain a vide	49
3.9.1.2 sain en charge	50
3.9.2Etat défailante de la MAS (court-circuit entre spire)	52
3.9.2.1 état défaut a vide de la MAS	53

3.9.2.2 1 état défaut avide de la MAS.....	54
3.10 Analyse spectrale.....	56
3.11.	
Conclusion	59
Conclusion générale	60
Bibliographie.....	K

Table des figures

Chapitre 1 Généralité sur les machines asynchrones

Figure 1.1 : classifications des machines électriques alternatifs.....	03
Figure 1.2 : constitution de la machine asynchrone.....	04
Figure 1.3 : schéma présente l'enroulement du stator.....	04
Figure 1.4 : Vue d'un rotor à cage.....	04
Figure 1.5 : Vue d'un rotor bobiné.....	05
Figure 1.6 : Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone.....	05
Figure 1.7 : Schéma présent principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.....	06
Figure 1.8 : Diagramme et bilan de puissance d'une machine asynchrone.....	07
Figure 1.9 : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone.....	08
Figure 1.10 Branchements des bobines internes de la machines asynchrone.....	08
Figure 1.11 : Les couplages des moteurs asynchrones (étoile et triangle).....	09
Figure 1.12 : les causes internes des défauts de la machine asynchrone à cage.....	12
Figure 1.13 : les causes externes des défauts de la machine asynchrone à cage.....	13
Figure 1.14 : Répartition des pannes des machines asynchrones.....	15
Figure 1.15 : Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes Puissances....	15
Figure 1.16 : Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances.....	16
Figure 1.17 : Court-circuit entre spire.....	19
Figure 1.18 : Ruptures de barres.....	20
Figure 1.19 : modélisation schématique de l'excentricité statique, dynamique et mixt.....	21
Figure 1.20 : Déférentes défaillances des roulements à billes.....	22
Figure1.21 : représontation de qelque grandeures mesurables sur une machine asynchrone.....	24

Figure1.22 : Principe de surveillance par analyse spectrale.....	25
--	----

Chapitre 2 : Modélisation de la machine asynchrone

Figure 2.1: Organigramme de différentes méthodes de modélisation de la MAS.....	27
---	----

Figure 2.2 : Schéma électrique équivalente de la cage rotorique.....	28
--	----

Figure 2.3: Réseau de perméances élémentaire autour d'une encoche statorique.....	29
---	----

Figure 2.4 : Fonction d'interpolation d'un élément.....	35
---	----

Figure 2.5 : Eléments classique en une et deux dimensions.....	36
--	----

Figure 2.6 : Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D.....	39
---	----

Chapitre 3 : simulations de la machine asynchrone

Figure 3.1 : Bobinage statorique.....	40
---------------------------------------	----

Figure 3.2 : circuit magnétique de la MAS.....	41
--	----

Figure 3.3 : Répartition du maillage.....	43
---	----

Figure 3.4 : Circuits représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.....	44
---	----

Figure 3.5 : Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.....	45
---	----

Figure 3.6 : Répartition des lignes équiflux.....	47
---	----

Figure 3.7 : résultat des grandeurs électromécaniques en régime sain auid.....	49
--	----

Figure 3.8 : résultat des grandeurs électromécaniques en régime sain en charge.....	51
---	----

Figure 3.9 : circuit équivalent on présence de défaut.....	52
--	----

Figure 3.10: Répartition des lignes équiflux.....	52
---	----

Figure 3.11: résultat des grandeurs électromécaniques en régime défailent a vidé.....	54
---	----

Figure 3.12: résultat des grandeurs électromécaniques en régime défailent en charge.....	56
--	----

Figure 3.13 : Le spectres du courant statorique à vide sans défaut.....	63
---	----

Figure3.15 Le spectres du courant statorique à vide avec court-circuit.....	64
---	----

Figure4.16 Les spectres du vitesse statorique à vide avec court-circuit.....	64
--	----

Listes des tableaux

Tableau 3.1 : caractéristiques de machine asynchrone.....	43
Tableau 3.2: B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN [34].0.9.....	47

Liste des symboles

L : La longueur de conducteur.

V : La vitesse de conducteur.

B : Induction magnétique.

F_m : La force mécanique.

E_0 : Générateur de f.é.m.

R : Résistance interne.

I : Le courant.

F_e : Force électromagnétique.

E : Force électromotrices (f.é.m).

Ω : Domaine surfacique.

A : Potentiel magnétique.

T : Frontière de domaine.

μ_0 : perméabilité magnétique de l'air.

μ_r : la perméabilité relative de fer.

ε : Permittivité électrique

μ : Perméabilité magnétique.

J : Densité de charge.

ρ : Charge électrique.

σ : Conductivité électrique.

j : Unité imaginaire.

t : Temps.

L_1, L_2, L_3 : Inductance de fuite des têtes des bobine statorique.

R_1 : La résistance d'un fil de l'enroulement statorique.

R'_1 : Résistance de conditor bobine statorique.
 R_2 : La résistance d'une file de l'enroulement rotorique.
 R'_2 : Résistance de conductor bobine rotorique.
 ω_s : Pulsation statorique.
 P : Nombre paires de pôles.
 $N\omega_s$: Ordre des harmoniques de temps de la FMM.
 N_d : Ordre de l'excentricité.
 F_s : Fréquence d'alimentation.
 F_r : Fréquence rotorique.
 f_{he} : Fréquence des harmonique d'encoches rotorique.
 f_v : Fréquence caractéristique de vibration.
 F_b : Fréquence caractéristique du défaut de barres.
 N_b : Nombre d'élément roulant de roulement.
 f_m : Fréquence de rotation de rotor.
 f_r : La fréquence rotorique.
 f_s : La fréquence statorique.
 g : Le glissement.
 N_r : Vitesse de rotation.
 P : Nombre de pair de pôles.
 ω_m : Vitesse angulaire de rotation de rotor.
 ω_r : Pulsation rotorique.
 ω_s : Pulsation statorique.
 Ω_m : Vitesse de rotation de la MADA.
 p_s : Puissance statorique.
 p_{mec} : Puissance mécanique.
 p_r : Puissance rotorique.
 C_e : couple électromagnétique.
 C_r : couple résistant.
 J : Moment d'inertie des parties tournant.

MADA : Machine a doublé alimentation.

FFT : transformée de fourier rapide.

MCSA : Motor Curent Signature Analyse.

FEM : finité Elément méthode.

Introduction générale

L'utilisation des machines asynchrones à rotor à cage d'écureuil dans les entraînements industriels est en pleine expansion, du fait de leur robustesse, de leur coût de fabrication relativement faible et la quasi-absence en entretien. D'autre part, le formidable progrès technologique des composants de l'électronique de puissance entraînant le développement des convertisseurs statiques a favorisé une large application des machines asynchrone [30,18,16]. 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 faibles 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. [1] [2]

L'objectif de ce travail est la modélisation de la machine asynchrone en utilisant la simulation par la méthode des éléments finis en vue de leur diagnostic.

Dans le premier chapitre nous allons présenter la constitution de la machine asynchrone et aussi leurs différentes défaillances qui peuvent se produire sur ce type de machine. Par la suite nous allons donner un état de l'art sur les méthodes de diagnostic des machines asynchrones.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation du modèle de simulation par la méthode des éléments finis, Sous logiciel Flux 2D pour analyser le comportement de la machine en absence e Présence de défaillances.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les résultats de simulation du moteur Asynchrone triphasée dans les différentes conditions de fonctionnement, (avec et sans défaut). Nous monterons les effets du court-circuit entre spires sur les différentes grandeurs électriques et électromagnétiques de la machine. Finalement on applique la transformation de Fourier Rapide(FFT) pour l'analyse spectrale des courants statorique. Nous terminerons ce mémoire par une conclusion général

1.1 Introduction

Le moteur asynchrone, ou moteur à induction, est le moteur le plus utilisé dans la plupart des entraînements électrique. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple, robuste mécanique et facile à construire, leur stator est relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constante, il tourne à vitesse peu différente de la vitesse de synchronisme ; c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante. Il permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il occupe dans ce domaine ne cesse de croître. [5]

Ce chapitre introductif nous permet de situer notre démarche par rapport aux autres travaux de recherche dans le domaine du diagnostic des machines asynchrones. Au début, il rappelle la constitution de la machine asynchrone, ainsi que les principaux défauts électriques qui peuvent la toucher. Ensuite nous abordons les différentes techniques de modélisation et qui ont initiées notre démarche en mettant l'accent sur la spécificité de ces méthodes en termes de précision et de complexité de mise en œuvre. Puis, les méthodes de diagnostic les plus fréquemment utilisées sont décrites.

1.2 Classification de machines électriques tournantes

Les moteurs électriques sont généralement classés selon le type du réseau électrique dans Le quelle le moteur est relié : moteurs à courant continu (DC) et des moteurs à courant alternatif (CA). Les moteurs avec alimentation AC sont subdivisés en deux synchrones et asynchrones. La différence fondamentale entre une machine à induction et une machine synchrone réside dans la vitesse du rotor de la machine à induction sous charge ne coïncide pas (est asynchrone) avec la vitesse du champ magnétique, généré par la tension d'alimentation.

Les moteurs à induction sont divisés en deux catégories principales : monophasé et triphasé, le premier type de moteurs à induction n'est pas étudié dans ce travail. Les moteurs à induction triphasés sont classés en fonction du type du rotor :

Rotor à cage et rotor bobiné. La classification principale est illustrée à la figure (1.1) [6].

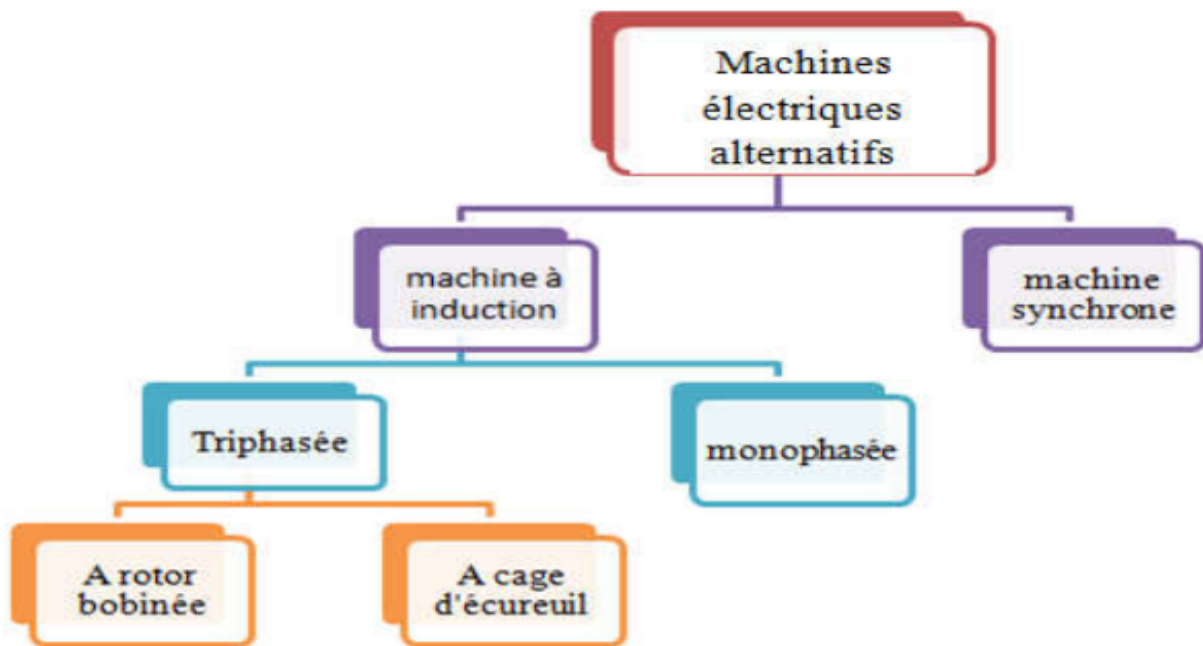


Figure 1.1 : classifications de machines électriques alternatives [6].

I.3 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor figure (1.2). Contrairement aux machines synchrone et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction. La figure (1.2) représente la machine asynchrone. Du point de vue mécanique, la machine asynchrone est subdivisée en trois parties distinctes :

- Le stator : partie immobile est la partie où est connectée l'alimentation électrique
- Le rotor : partie tournante, elle permet de mettre en rotation la charge magnétique
- Les paliers : organes de support, ces derniers constituent la partie mécanique permettant ainsi la mise en rotation de l'arbre moteur. [8]
- L'entrefer : Cette partie est amagnétique (c'est le vide entre le rotor et le stator)

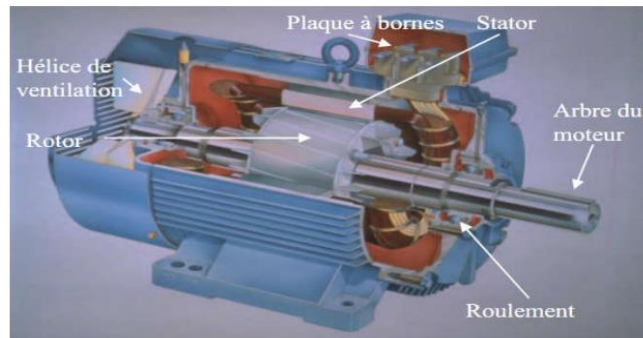


Figure 1.2 : constitution de la machine asynchrone [8].

1.3.1 Le stator

C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0,5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le « feuilletage » du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Les tôles sont munies d'encoches dans les quelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas moteur triphasé). Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation.



Figure 1.3 : schéma présente l'enroulement du stator [9].

1.3.2 Le rotor

C'est l'élément mobile du moteur. il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Cet élément, de par sa technologie, permet de distinguer deux familles de moteurs asynchrone : ceux dont le rotor est dit « à cage », et ceux dont le rotor bobiné est dit « à bagues ». [9]



Figure 1.4 : rotor à cage [9].



Figure 1.5 : rotor bobiné [9].

1.3.3 L'entrefer

Cette partie amagnétique (c'est un vide entre le stator et le rotor) est d'épaisseur la plus faible (de l'ordre du millimètre), cette épaisseur réduite rend la taille de l'entrefer sensible aux variations dues aux encoches statoriques. Ceci crée des harmoniques dites d'encoches, pour les réduire, les encoches sont fermées par des cales magnétiques qui maintiennent le bobinage. [8]

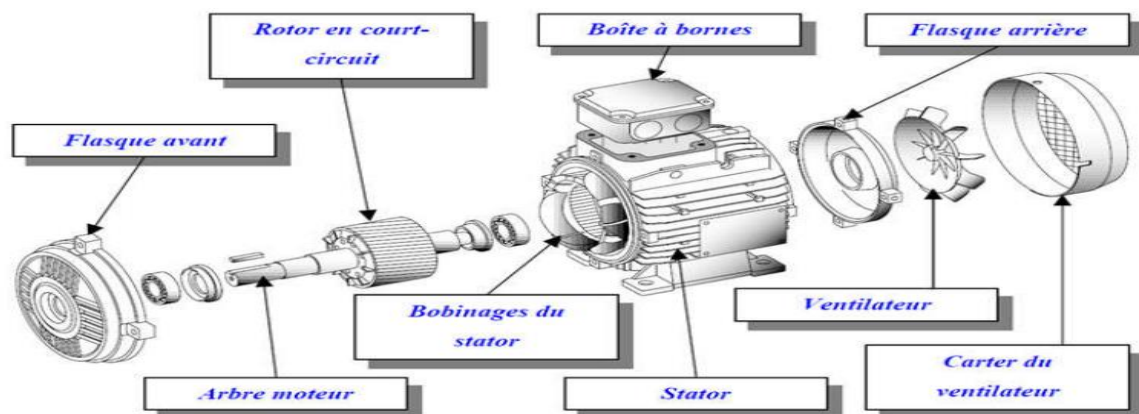
1.3.4 Les organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor il est supporté par un ou plusieurs paliers.ces

derniers soutiennent le rotor et assurent la 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 dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements [8].

Pour les machines de petite et moyenne puissance. Dans La plupart du temps on trouve aussi



un ventilateur de refroidissement [8].

Figure I.6 : Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone [8].

1.4 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

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

Ce fonctionnement repose sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, crée par les courants triphasés fournis à l'enroulement statoriques par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse différente du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulements rotorique montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine lorsque le champ est sinusoïdale. La vitesse de rotation est :

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (1.1)$$

Où : f : la fréquence d'alimentation.

P : représente le nombre de paires de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), c'est-à-dire lorsque $n \neq n_1$, car dans le cas contraire, ($n = n_1$), le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport $g = \frac{n_1 - n}{n_1}$ est appelé glissement de la machine asynchrone [10].

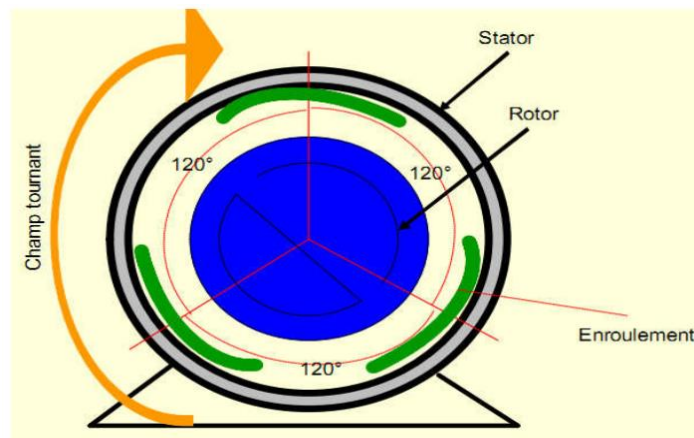


Figure 1.7 : Schéma présent principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone [10].

1.5 Bilan des puissances

Le principe de MAS consiste à transmettre une puissance absorbée (électrique) vers une puissance utile (mécanique) passe par quelques étapes comme sur la figure ci-dessous [10]

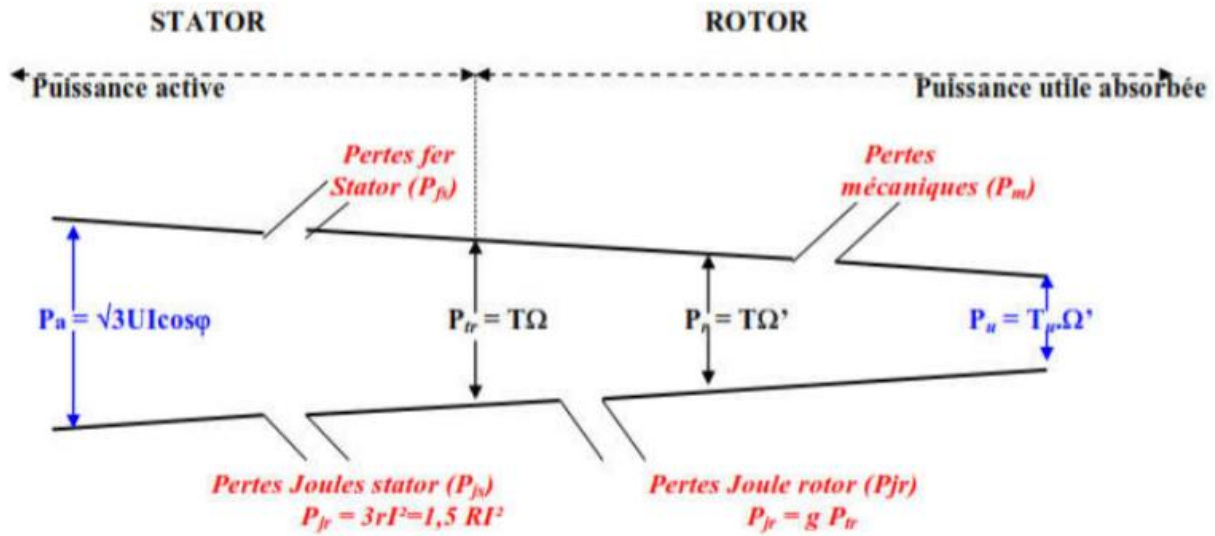


Figure 1.8 : Diagramme et bilan de puissance d'une machine asynchrone : [7]

Avec :

Ω : vitesse de synchronisme.

$\Omega' = \Omega_r$: vitesse de rotor.

$T = C_e$: couple transmis au rotor ou couple électromagnétique.

$T_u = C_u$ couple utile.

p_{tr} : Puissance électromécanique transmise au rotor.

p_r : Puissance mécanique du rotor.

R : résistance entre phase du stator.

p_m : perte mécanique.

$$\text{Perte joule rotor : } p_{jr} = C_e(\Omega - \Omega') = C_e\Omega \left[\frac{(\Omega - \Omega')}{\Omega} \right] = p_{tr} \quad (1.2)$$

1.6 Plaque signalétique

Chaque machine électrique dispose d'une plaque signalétique qui constitue une sorte de carte d'identité du moteur [12]

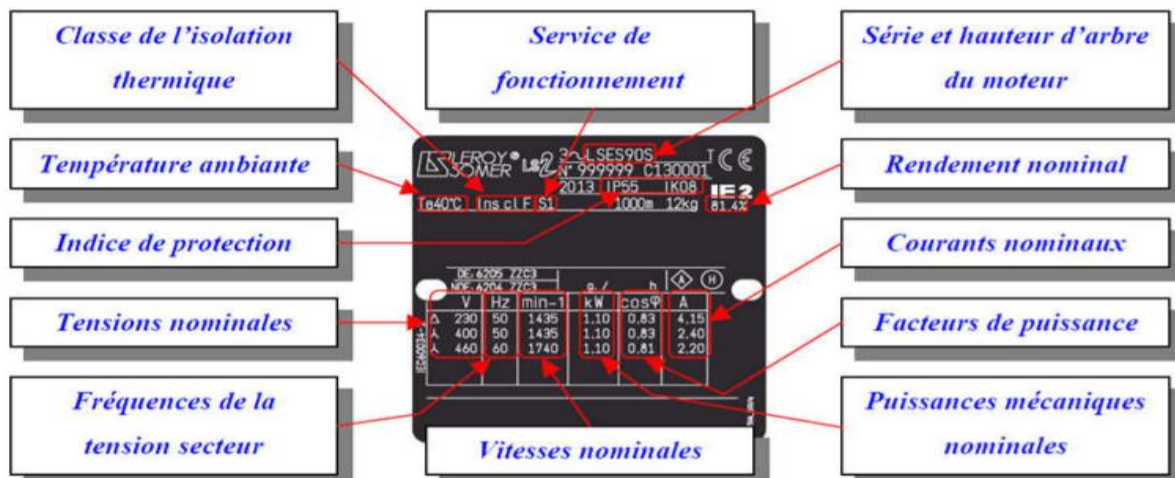
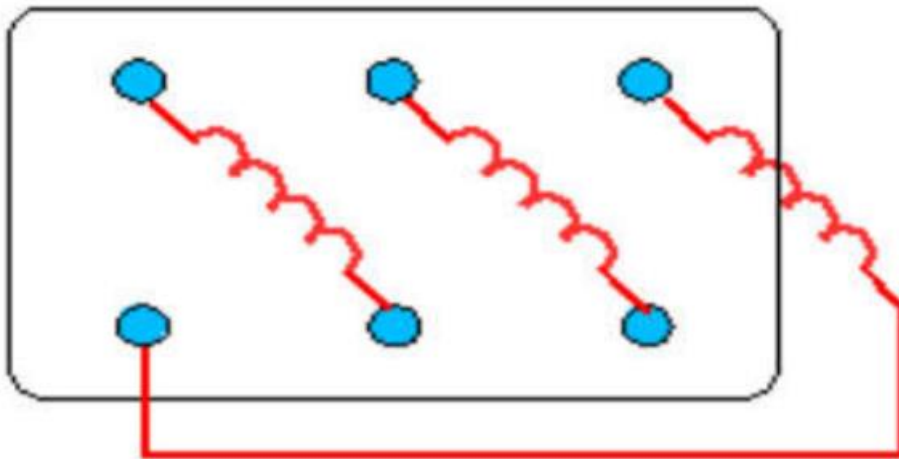


Figure 1.9: Plaque signalétique d'un moteur asynchrone [12].

1.7 Le bobinage d'un moteur asynchrone :

Les bobines sont logées dans les encoches du stator. Le branchement des bobines sur le réseau se fait au niveau de la plaque à borne située au dessus du moteur. On dispose ainsi de 6 connexions, une pour chacune des extrémités des trois bobines. Les bornes sont reliées aux



bobines selon le schéma suivant [13]

Figure 1.10 : Branchements des bobines internes de la machine asynchrone [13].

1.8 Plaque à bornes

Il y a deux possibilités de branchement du moteur au réseau électrique triphasé. Le montage en étoile et le montage en triangle comme la figure ci-dessous montre [13].

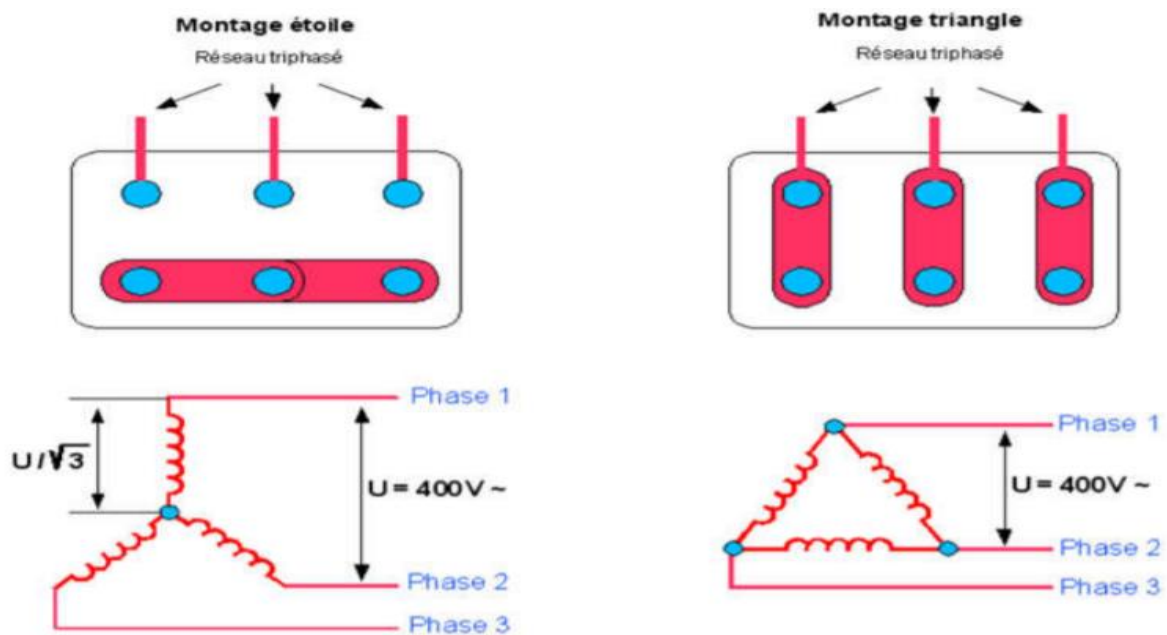


Figure 1.11: Les couplages des moteurs asynchrones (étoile et triangle) [13].

1.9 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone

Comme les autres machines électriques, la MAS présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs : sa structure, sa stratégie de commande et ses applications [17].

1.9.1 Avantages

Parmi les avantages de la machine asynchrone et notamment en fonctionnement moteur, on peut citer [17] :

- Sa robustesse mécanique.
- Son faible coût.
- L'absence d'entretien constant.

1.9.2 Inconvénients

L'inconvénient majeur du moteur asynchrone est relié à l'absorption du réactif qu'il faut parfois Compenser, à des pertes de glissement et surtout à la nécessité de fonctionner pratiquement au Voisinage de la vitesse de synchronisme.

- Le courant de démarrage plus élevé (5 à 8 fois le courant nominal).
- Difficile de contrôler la vitesse [17].

1.10 Etude des différents défauts de la machine asynchrone

La machine asynchrone s'imposait par rapport à d'autre machine grâce à sa robustesse et son faible coût, elle peut parfois représenter différents types de défaillances, ces défaillances peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique pouvant touchés différents organes. Leurs causes sont très variées. Dans le but d'une présentation synthétique, ces défauts peuvent se classer en deux familles principales, les figures (1.14) et (1.15) regroupent ces causes [18].

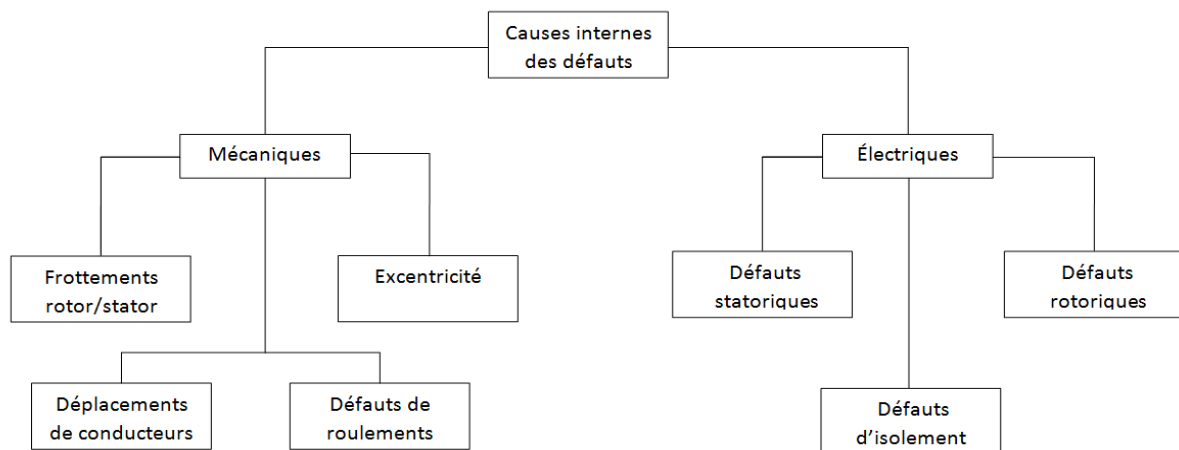


Figure 1.12 : les causes internes des défauts de la machine asynchrone à cage [19]

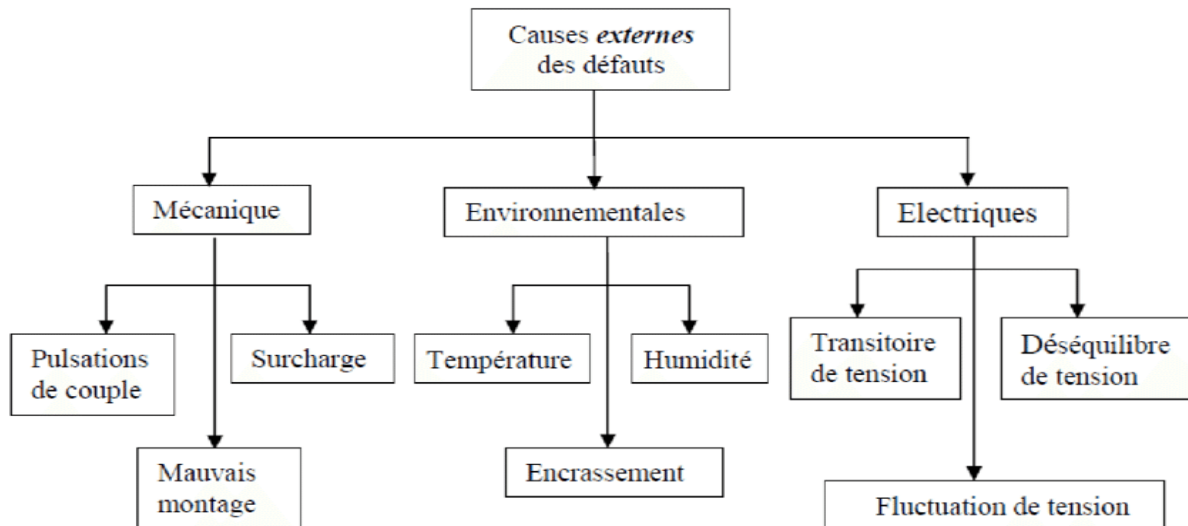


Figure 1.13 : les causes externes des défauts de la machine asynchrone à cage [19]

1.10.1 Définitions et concepts

- Une défaillance : est une anomalie de fonctionnement au sein d'un système physique.
- Une panne : est Un défaut : est une anomalie de comportement au sein du système. Ce concept est Important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels [20].
- L'incapacité d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une Panne résulte toujours d'une défaillance.
- La cause : Circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation, à L'utilisation et la maintenance qui ont conduit à la défaillance [21].

De multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone, elles peuvent être Prévisibles ou intempestives, mécanique, électrique ou magnétique et leurs causes sont très Variées [05].

1.10.2 Causes des défauts

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes :

- Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut Électrique (court-circuit), problème mécanique, rupture de fixation, problème d'isolation, survolage d'alimentation
- Les amplificateurs de défauts : surchauffe fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, alimentation perturbée (instabilité de la tension ou de la fréquence), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement...
- Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, défectuosité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine...

1.10.2.1. Cause des défauts au statorique

Les défauts statoriques peuvent être dus à plusieurs raisons, parmi lesquelles :

- Un grand noyau du stator où la température d'enroulements est élevée.
- Attachement lâche à la fin de l'enroulement.
- Contamination due à l'huile, à la moisissure ou à la saleté.
- Cycle de démarrage fréquent.
- Surtension, décharges électriques, et fuites dans les systèmes de refroidissement. [22]
[23]

1.10.2.2. Cause des défauts rotoriques

Comme pour le stator, les raisons pour les cassures des barres rotoriques et de rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit sont nombreuses :

- Effort thermique dû à l'échauffement de l'anneau de court-circuit et à la différence de la température dans la barre pendant le démarrage (effet de peau).
- Effort magnétique causé par les forces électromagnétiques (flux de fuite d'encoche, excentricité de l'entrefer), bruits et vibrations électromagnétiques.

- Effort dynamique dû au couple de charge, aux forces centrifuges ainsi qu'aux efforts cycliques.
- Effort environnemental causé par la contamination, l'abrasion des matériels rotoriques due aux particules chimiques. [22], [23]

1.10.3. Etude Statistique

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie allemande de Systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de faible et moyenne puissance (50KW à 200KW) a donné les résultats suivants :

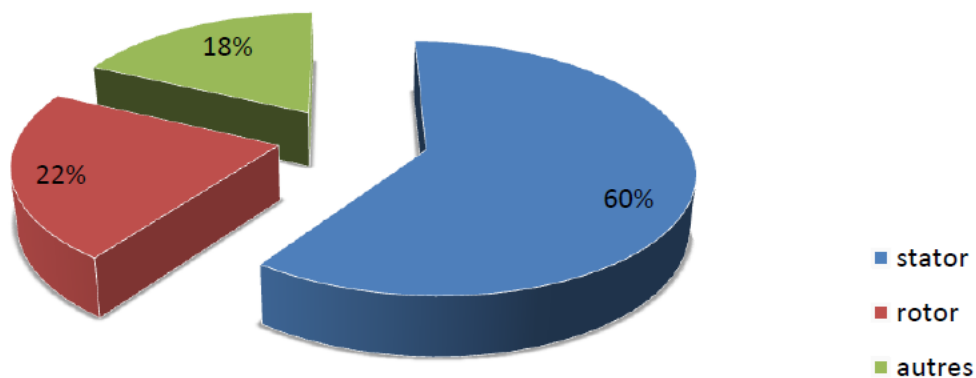


Figure 1.14 : Répartition des pannes des machines asynchrones.

D'autre part, les mêmes études montrent qu'entre 1973 et 1988, les pannes au stator sont passées de 78% à 60% et les pannes au rotor sont passées de 12% à 22%. Ces variations sont dues à l'amélioration des isolants sur cette période. La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est donnée sur la figure 1.16

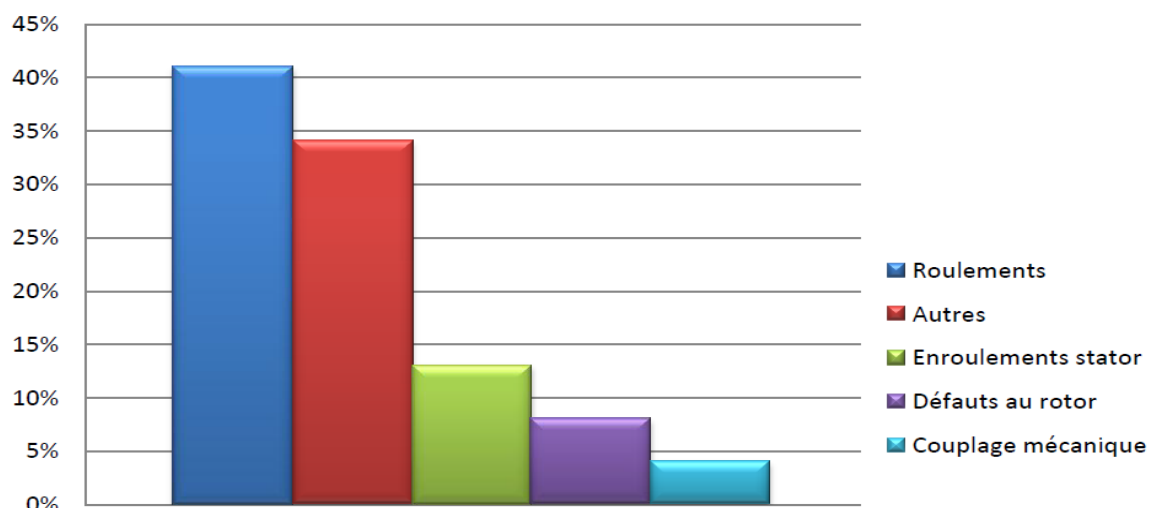


Figure 1.15 : Répartition des pannes sur les machines de faibles
Et moyennes Puissances [24].

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) a montré que pour cette gamme de puissance, les pannes les plus fréquentes se situent sur les roulements. Le stator et le rotor sont le siège de 12% et 8% des pannes. [25]

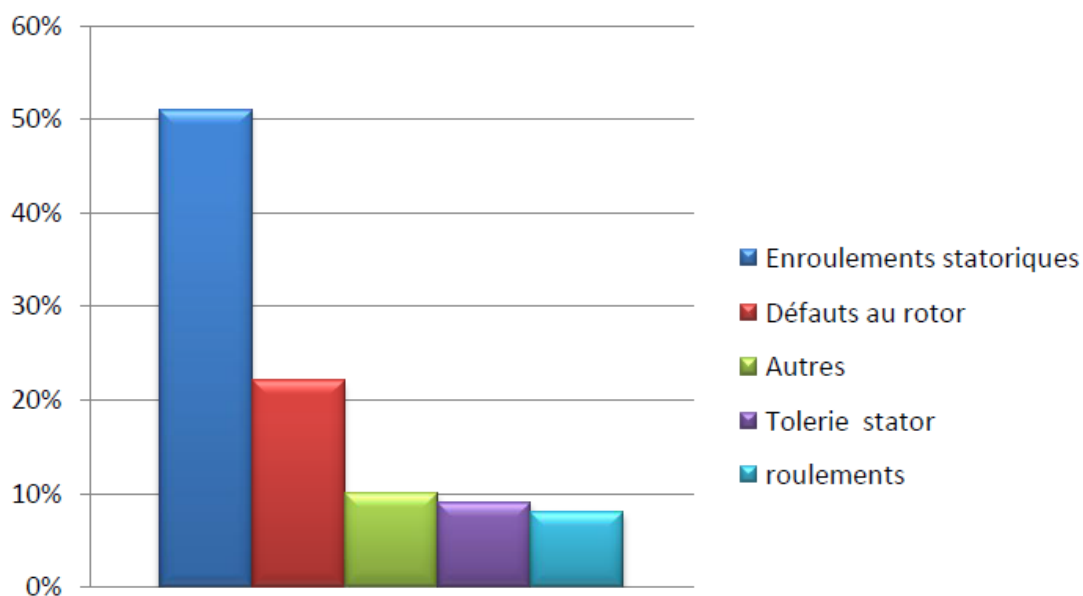


Figure 1.16 : Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances [25]

De ces exemples, nous constatons que les défauts dans le stator sont plus fréquents dans les machines de moyenne puissance. Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour les machines de fortes puissances ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue.

Ces études montrent aussi que certains défauts sont plus fréquents que d'autres, parmi ces défauts :

1.11. Les différents défauts de la machine asynchrone

1.11.1. Défauts statoriques :

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème. [26]

- **Thermique** : l'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de cette température de fonctionnement, la durée de vie raccourcit rapidement (Fig. I-4). Cette augmentation de la température peut être due à une variation de tension ou de déséquilibre, à la répétition des démarrages dans un court laps de temps, à des surcharges, à une mauvaise ventilation ou alors à une haute température ambiante
- **Electrique** : Une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs de dû à l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du convertisseur statique, vont conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation. Des bobines La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation. Ces

spots causent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut).

- **Mécanique** : les démarrages répétitifs de machine ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre (bobinage statorique et cage). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure.

Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration

- **Environnemental** : La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant. Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit : défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et bâti, déséquilibre d'alimentation, défaut de circuit magnétique.

1.11.1.1. Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des court-circuit. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,) engendrent une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné [27].

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.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- Vibrations mécaniques.
- Vieillessement 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.

Lorsque le défaut de l'isolant se crée sur une spire, le courant de défaut circule entre le cuivre de cette spire et la tôle du stator (défaut phase - masse). Il peut aussi circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est détérioré (défaut entre-spires). Dans le cas des bobinages à deux couches, une même encoche peut contenir des conducteurs de deux phases différentes.

La détérioration simultanée et dans une même zone, des isolants de ces deux bobines provoque un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaut phase-phase).

Ce type de défaut peut aussi exister dans les bobinages à une couche au niveau des têtes de bobines où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact. La topologie du circuit électrique est ainsi influencée par ces défauts.

1.11.1.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Ce défaut 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 dans le cas des machines asynchrones [28].

Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en

chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut.

1.11.1.3. Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. 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 deux phases a de moins graves conséquences ; il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre dépend de la localisation du défaut. Dans le cas des machines asynchrones, les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce type de défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de Phases.



Figure 1.17 : Court-circuit entre spire [29].

1.12.2. Défaits rotoriques

Les défauts rotoriques se situent au niveau de la cage ou au niveau de l'entrefer. Au niveau de la cage les défauts se résument à la rupture de barres de la cage ou à la rupture d'anneaux de court-circuit. Au niveau de l'entrefer les défauts se manifestent par une excentricité statique, dynamique ou mixte.

Ces défaillances sont essentiellement dues à un problème [30], [31]:

- thermique (surcharge...)
- électromagnétique
- résiduel (déformation...)
- dynamique (arbre de transmission...)
- environnemental (agression...)

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

1.11.2.1. Ruptures de barre

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées. [32]



Figure 1.18 : Ruptures de barres.

1.11.2.2. Ruptures d'anneaux

La rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit dans une machine asynchrone à cage, est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voire confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres. [32]

1.11.2.3. Excentricité statique, dynamique et mixte

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor, Figure I.13.). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique et mixte) 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). [33]

Trois cas d'excentricité, sont généralement distingués :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités

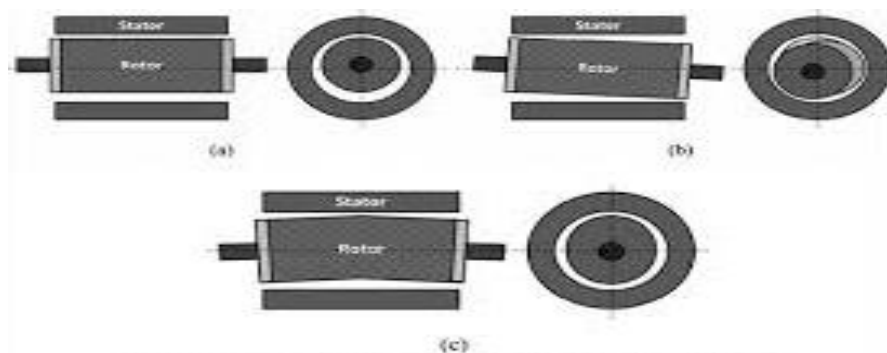


Figure 1.19 : modélisation schématisée de l'excentricité statique, dynamique et mixte

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. [34]

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [35]

1.11.2.4. Roulement à billes

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts des roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine.

Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statorique permet de détecter ce type de défaillances. [36]

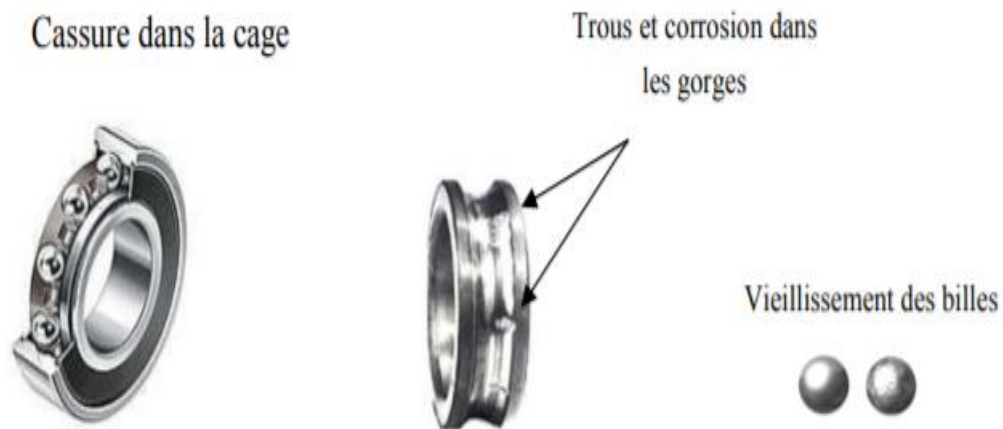


Figure 1.20 : Différentes défaillances des roulements à billes.

Classiquement ce type de défaut est diagnostiqué à partir du spectre d'une mesure acoustique ou vibratoire, on distingue [37]:

- Trous dans les gorges du roulement intérieurs et extérieurs,
- Ondulation de la surface du roulement,
- Attaque des billes,
- Corrosion due à l'eau,
- Défaut de graissage, problème dû à la température,
- Décollement, effritement de surface, provoquée par une surcharge.

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 entraînant 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.

1.11.3. Autres défaillances

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc a priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs.

1.11.4. Défaits extérieurs (d'environnement)

Ces effets sont principalement dus à un problème de nature [38]:

- Electriques : régime transitoire et déséquilibré d'alimentation,
- Thermiques : la température ambiante élevée, points chauds, surcharge...
- Mécaniques : agression, choc en service, jeux,
- Dynamiques : arbre de transmission de rotor et le bobinage pour le stator.
- Chimiques : corrosion, humidité ...

1.12. Surveillance des machines électriques

1.12.1. Des grandeurs mesurables et des signaux de défaut

La démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic de défauts sur les machines électriques, est l'analyse des grandeurs mesurables et les signaux de défaut. La figure 1.23 montre une représentation des mesures sur une machine électrique.

Les grandeurs et signaux de défauts les plus fréquemment utilisés sont :

- Les courants statoriques ;
- Le flux rayonnant de dispersion ;
- La tension d'alimentation ;
- La tension de neutre ;
- Le couple électromagnétique ;
- La vitesse de rotation ;
- La puissance instantanée ;
- Les courants dans le repère de park i_d, i_q
- La vibration mécanique.

Ces signaux donnent des informations qui peuvent être ou non redondantes. Cependant, l'équipement nécessaire pour l'acquisition des signaux reste encore coûteux. Le traitement des informations mesurées est un travail d'identification de la panne à travers sa signature [39].

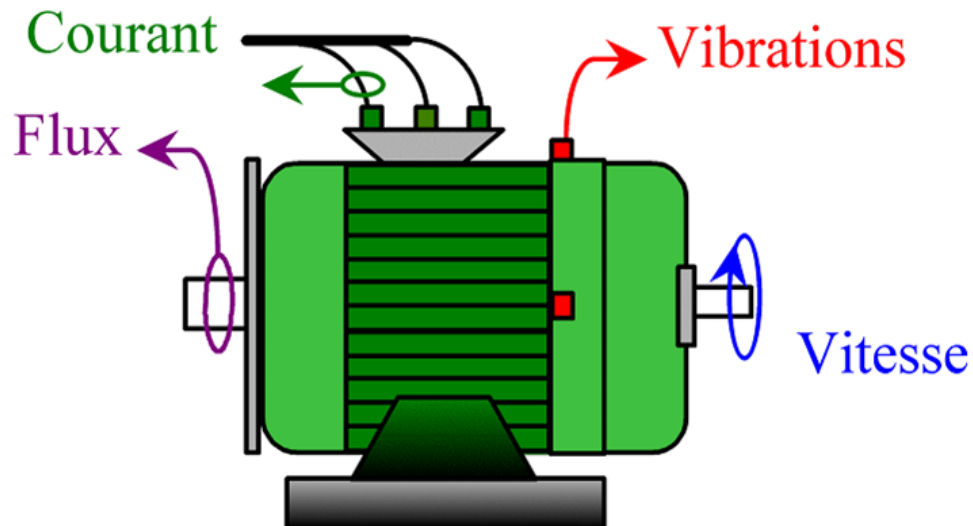


Figure1.21 . représentation de quelques grandeurs mesurables sur une machine asynchrone.

1.12.2. Analyse spectrale

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et le court-circuit dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste donc à effectuer une transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont soit électriques (plus particulièrement les courants de ligne), soit mécaniques (vibration, couple électromagnétique) [41].

Cette technique permet une surveillance rapide et peu onéreuse car elle exige un simple capteur de courant ou de vibration.

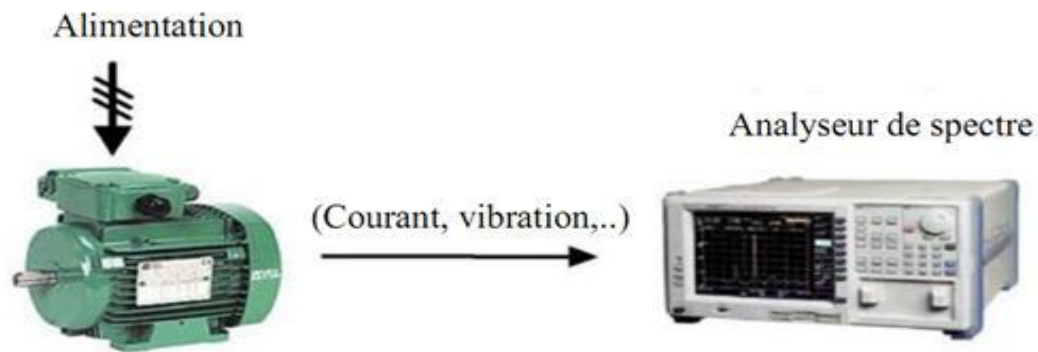


Figure 1.22. Principe de surveillance par analyse spectrale.

1.13 Conclusion

Dans ce premier chapitre après quelques rappels sur la constitution de la machine asynchrone ainsi que les principaux défauts qui peuvent gêner leur fonctionnement et les différentes causes probables.

À la fin Nous avons donné une synthèse de différentes méthodes de diagnostics de la machine asynchrone triphasée en présence des défauts.

L'objectif de deuxième chapitre est la modélisation de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis avec logicielle flux 2d

2.1 Introduction

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, la vérification sur le prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défauts et elles apportent également la possibilité de construire des bases des données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Parmi les approches de modélisations existantes, nous allons baser sur la méthode des éléments finis, [10,20]

Dans ce chapitre nous allons présenter la méthode des éléments finis (MEF) dans le régime magnéto dynamique sous logiciel Flux 2D® [26] de la machine asynchrone

2.2 Modélisation de la machine asynchrone

Les modèles décrivant le fonctionnement de la machine asynchrone en présence de défauts peuvent être groupés en modèles physiques et en modèles comportementaux :

Les modèles physiques :

Se basent sur les lois de l'électromagnétisme pour décrire le fonctionnement de la machine. ces modèles peuvent varier en complexité et/ou en précision selon la méthode de modélisation utilisée.

Les modèles comportementaux :

Quant à eux, modifient les modèles issus de la physique en y introduisant des paramètres supplémentaires qui permettent la détection et, dans certains cas, la localisation du défaut observé. [43].

Ces modèles comportementaux peuvent être directement utilisés dans les procédures de diagnostic,

Nous exposons les principales méthodes de modélisation fine de la machine asynchrone à cage défectueuse comme la méthode des réseaux de perméances (RNM), la Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC), la Modélisation analytique par CEMC (CEMC-A), le Modèle à circuits internes équivalents (CIE), et la méthode des éléments finis.

Nous allons, dans ce qui suit, commencer par décrire chacune des méthodes de modélisation fine de la machine asynchrone défectueuse, [44].

L'organigramme ci-dessus et représenté les différents méthodes de diagnostic de la MAS.

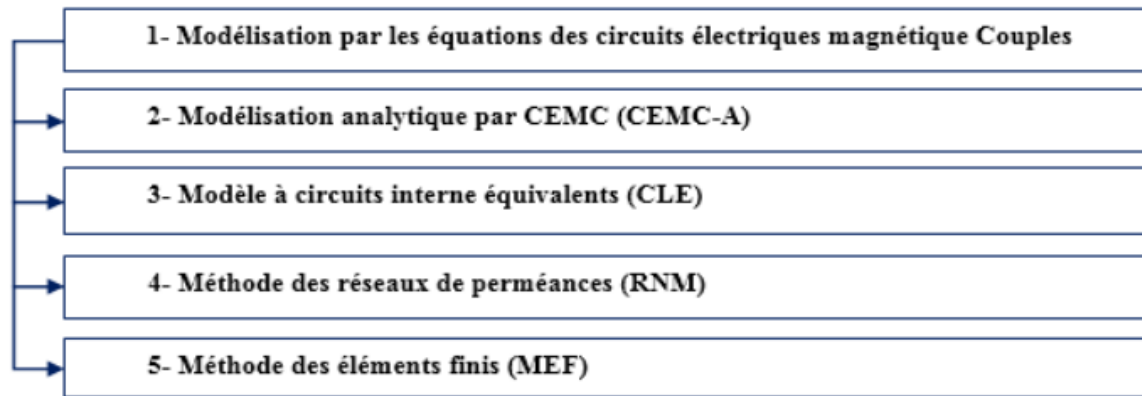


Figure 2.1: Organigramme de différentes méthodes de modélisation de la MAS

2.2.1 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC)

Dans la modélisation par les équations des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC), les enroulements constituant le stator et le rotor sont représentés par un circuit électrique équivalent, forme par une inductance en série avec une résistance.

Par ailleurs, même si la méthode des CEMC ne permet pas la prise en compte de certains phénomènes complexes (saturation, effet de peau, etc.), il est possible de corriger le modèle par le biais de coefficients globaux pouvant renseigner sur leur influence sur les grandeurs globales, [07].

Ainsi, malgré ses faiblesses, l'approche de modélisation par CEMC offre un bon compromis en termes de précision, de temps de calcul et d'adaptation à la modélisation de la plupart des défauts d'origine électromagnétique de la machine asynchrone.

Le rotor est représenté par un circuit électrique comportant des mailles magnétiquement couplées comme le montre la figure (2.2).

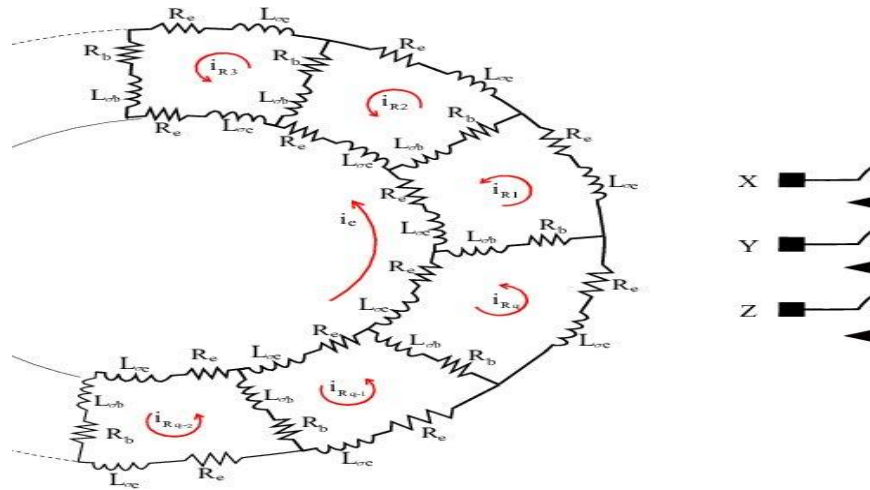


Figure 2.2 : Schéma électrique équivalente de la cage rotorique, [10].

L'écriture du modèle triphasé de la machine asynchrone par l'approche des CEMC est basée sur un certain nombre d'hypothèses dont les principales sont les suivantes :

- Le fer (les tôles) est de perméabilité infinie ;
- Les pertes par courants de Foucault sont négligeables ;
- Les courants inter-bars sont négligeables (tôles magnétiques rotoriques isolées des barres et des anneaux de la cage).

La première hypothèse peut cependant être partiellement contournée par l'introduction de l'onde fondamentale de saturation dans l'expression de la perméance de l'entrefer permettant ainsi la prise en compte de la chute de tension magnétique (f.m.m.) dans le fer. Quant à la troisième hypothèse, il faut dire qu'elle est partagée par toutes les méthodes de modélisation tant les courants inter-bars sont difficiles à prendre en compte de façon locale.

2.2.5 Méthode des éléments finis

Si la méthode des réseaux de perméances permet d'introduire la saturation des matériaux magnétiques dans la modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts augmentant du coup la précision du modèle par rapport à la méthode CEMC, la méthode des éléments finis, quant à elle, nous affranchit de la plupart des hypothèses simplificatrices habituelles lors de la modélisation des machines électriques tournantes.

Dans la méthode des éléments finis Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de dimension faible pour permettre de considérer le matériau magnétique linéaire sur les surfaces correspondantes. [44]

Dans le domaine du diagnostic de la machine asynchrone, la méthode des éléments finis est utilisée dans le but de comprendre et de quantifier les conséquences locales d'un défaut sur les différentes parties de la machine, [44].

A titre d'exemple, la méthode des éléments finis permet l'étude des effets locaux du défaut de rupture de barres de la cage rotorique à savoir un échauffement local excessif dû à sollicitation électrodynamique de ces mêmes barres voisines pouvant conduire à la propagation du défaut. De même, la méthode des éléments finis sert à appréhender les impacts magnétiques et l'augmentation des courants circulant dans les barres voisines et une forte thermique locaux du défaut de court-circuit inter-spires dans les phases statoriques.

L'analyse des phénomènes électromagnétiques est basée sur la résolution des équations de Maxwell. On distingue deux techniques principales de résolution des équations des champs électromagnétiques :

2.2.5.1 Différences finies :

Le maillage est un quadrillage rectangulaire sur les nœuds pour lesquels est effectuée la discrétisation spatiale de l'équation différentielle, associée à la décomposition en série de Taylor du potentiel scalaire.

2.2.5.2 Eléments finis :

Le principe fondamental réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, le potentiel est approché par un polynôme de degré faible.

La résolution se ramène alors à la minimisation d'une fonction liée à l'énergie emmagasinée dans les éléments.

L'utilisation de méthode de calcul par éléments finis prend en compte la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques.

Les équations qui régissent le champ électromagnétique dans les systèmes électromagnétiques sont les équations de Maxwell, accompagnées des relations constitutives du milieu considéré

2.3 Condition aux limites

Généralement, on rencontre deux types de conditions aux limites :

2.3.1 Condition dirichlet

L'inconnu prend des valeurs données sur les bords du domaine on distingue deux types

- **Dirichlet homogène**

Où l'inconnu de l'équation est fixé sur la limite est considéré égal à zéro : $A=0$

- **Dirichlet non homogène**

Où l'inconnu de l'équation est fixé sur la limite et sa valeur est non nulle : $A \neq 0$

2.3.2 Condition de neumann

La valeur du gradient sur les bords du domaine de résolution est connue. On distingue deux types :

- **Neumann homogène**

la dérivé par rapport à la normal de l'inconnu est nulle : $\frac{\delta A}{\delta n} = 0$

$\vec{n}$: vecteur normal à la limite

Ce que signifie que les lignes iso-valeurs de l'inconnu sont perpendiculaires à la limite.

- **Neumann non homogène**

Dans ce cas , : $\frac{\delta A}{\delta n} = cte \neq 0$ ce que signifie que les lignes iso-valeurs de l'inconnu forment un angle α avec la limite.

2.4 Méthode des éléments finis

Cette méthode est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation sont d'une grande précision et elles nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques, lorsque le problème est correctement posé (géométrie, physique, lien avec les équations de circuit...) et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul (Logiciel) d'où une grande souplesse d'utilisation. 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 définit comme suit, [44]

• **Les relations de couplage électromagnétique :**

Le champ électrique induit est utilisé dans de nombreux générateurs électriques. Un aimant permanent en rotation qui crée un champ magnétique en mouvement, génère un champ électrique dans un fil à proximité [44]

$$\overrightarrow{rot}\vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\overrightarrow{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

• **Les relations de la conservation des flux :**

La formule de Maxwell-Flux (aussi connue sous le nom de Maxwell-Thomson ou Maxwell-Kelvin ; Thomson et Kelvin étant une et même personne) stipule que la divergence du champ magnétique est nulle

$$div\vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$div\vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

• **La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :**

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

- La relation de la loi d'Ohm :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

$\vec{H}$: 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 ($\Omega^{-1}m^{-1}$)

2.5 Le modèle employé

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

2.5.1 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 :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (2.8)$$

$$div \vec{B} = 0$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (2.9)$$

La condition (4.3) permet de définir une fonction en vecteur potentiel A telle que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A} \quad (2.10)$$

Pour que A soit totalement défini, il faut également fixer la valeur de sa divergence.

On ajoute alors la condition $div \vec{B} = 0$ appelée jauge de Coulomb. Qui vérifiée automatiquement l'unicité de la solution. Par la substitution de (4.10) et (4.9) dans (4.8) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

$$\overrightarrow{rot}(v. \overrightarrow{rot} \vec{A}) = \vec{j} + \overrightarrow{rot}(v. \vec{B}_r) \quad (2.11)$$

Où :

$v = 1/\mu$: est la réflectivité magnétique.

2.5.2 Le mode magnétodynamique :

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources du courant ou de la tension varient en fonction du temps, Le terme $\frac{\partial B}{\partial t}$ n'est pas nul. Et qui suppose la densité de courant sinusoïdale, et simuler 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 :

$$\overrightarrow{rot}(v. \overrightarrow{rot} \vec{A}) + \vec{j} \omega \sigma \vec{A} = \vec{j} \quad (2.12)$$

2.5.3 Le mode magnétique transitoire :

Est le plus complet. Il traduit fidèlement la rotation du moteur. Dans ce cas l'alimentation est en courant transitoire, le traitement du système précédent des équations caractéristiques,

nécessite une discrétisation pas à pas dans le temps. Donc le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{rot}(v.\overrightarrow{rot}\vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \overrightarrow{rot}\vec{B}_r \quad (2.13)$$

2.6 Principe de la méthode des éléments finis :

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 assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales. [45] [46]

Pour élément t triangulaire :

$$A_e(x,y)=a+bx+cy \quad (2.14)$$

Pour les éléments quadrilatéraux on a :

$$A_e(x,y)=a+bx+cy+dxy \quad (2.15)$$

Les constantes à b c et d sont à déterminer. Le potentiel A_e 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 :

$$A_e(x, y) = \sum_{e=1}^{ne} A_e(x, y) \quad (2.16)$$

e : Numéro d'élément.

ne : 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 4.1).

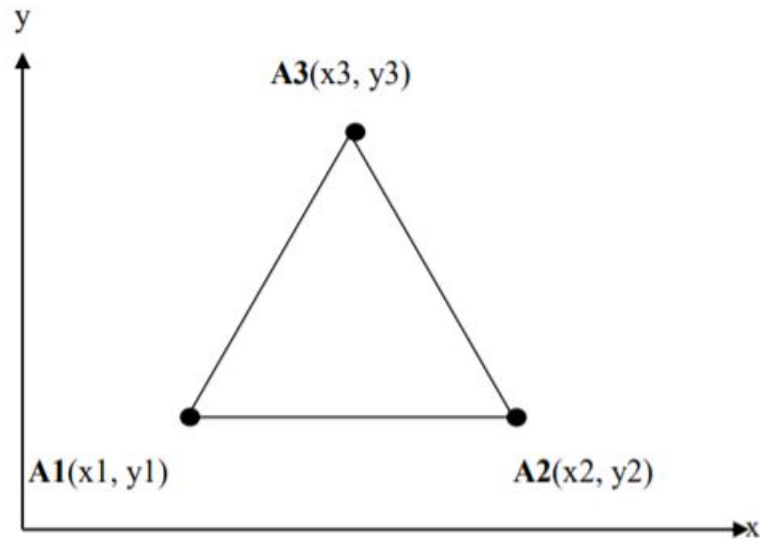


Figure 2.3 : Fonction d'interpolation d'un élément

2.7 Types d'éléments finis

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



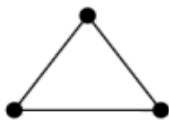
a) élément linéaire



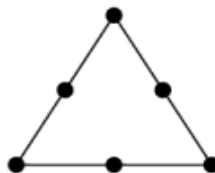
b) Quadratique



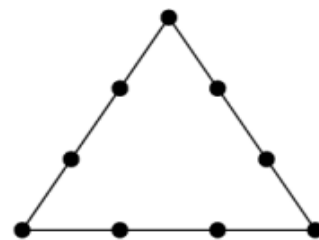
c) Cubique



a) élément linéaire



b) Quadratique



c) Cubique

Figure 2.4: Eléments classique en une et deux dimensions

Dans la majorité des cas bidimensionnels, on préfère utiliser des éléments triangulaires du premier ordre. Pour aboutir à une meilleure exactitude de la solution, on procède à raffiner le maillage. [47]

2.8 Discrétisation et approximation

L'idée fondamentale de la méthode des éléments finis est de subdiviser la région à étudier en petites sous régions appelées éléments finis constituant le maillage.

Les fonctions inconnues sont approximées sur chaque élément fini par une simple fonction appelée fonction de forme qui est continue et définie sur chaque élément seul.

La forme des éléments est directement liée à la dimension du problème (2D ou 3D). Pour une géométrie en (2D), on utilise généralement des triangles ou des quadrilatères ; pour une géométrie en (3D), on utilise les tétraèdres, les prismes ou les hexaèdres.

La discrétisation est une étape importante dans l'analyse par éléments finis car la précision des résultats dépend de la méthode de discrétisation et de la finesse de cette subdivision en sous-domaines [47]

La fonction inconnue est approchée dans chaque élément par une fonction d'interpolation nodale, faisant intervenir les valeurs de l'inconnue aux nœuds de ces éléments ainsi que les coordonnées géométriques de ces nœuds.

Dans le cas de calcul de champ dans les structures électromagnétiques, les éléments de forme triangulaire sont les plus utilisés, cette subdivision exclusivement triangulaire du premier ordre à l'avantage de s'adapter à toute configuration géométrique et permet de traiter des expressions simples.

2.9 Les avantages et les inconvénients de la méthode éléments finis

2.9.1 Avantages de la méthode des éléments finis

Saturation locale et avec détails de la Géométrie.

Adaptation aux géométries complexes.

Temps de calcul relativement avantageux.

Prise en compte des non linéarités.

2.9.2 Inconvénients de la méthode des éléments finis

Inapplicable sur les domaines infinis.

Mise en œuvre relativement difficile.

Présence des singularités dans le domaine d'étude.

2.10 Logiciel de résolution

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution :

Introduction des données géométriques et des propriétés physiques ; maillage ; résolution ; exploitation des résultats ; sont séquentiellement exécutées

Toutefois, en utilisant une méthode des éléments finis conventionnelle, il serait difficile de calculer les performances de la machine tenant compte à la fois des courants de Foucault induits dans les conducteurs massifs, des non-linéarités des matériaux magnétiques et des sources externes.

C'est dans cette perspective que nous avons opté pour une nouvelle formulation, mieux adaptée pour notre problème :

il s'agit d'une méthode dite directe permettant de résoudre simultanément les équations couplées du champ magnétique et des circuits électriques. Cette formulation est implantée dans le logiciel d'éléments finis Flux 2D que nous allons présenter dans ce qui va suivre.

2.11 Structure du FLUX 2D

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Nous ne détaillerons pas son fonctionnement car des tutoriaux sont très bien conçus et ce n'est pas le propos.

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 [17] :

2.11.1 Construction

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier (geometry & physics), de choisir et de construire une banque de matériaux (Materials database) et de définir le schéma et les données du circuit électrique (Circuit)

2.11.2 Module Solving Process

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

2.11.3 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.

2.12 Enchaînement de base dans FLUX2D

De façon générale, l’enchaînement des programmes de Flux 2D, doté d’une interface schématisée par la figure (II.2).

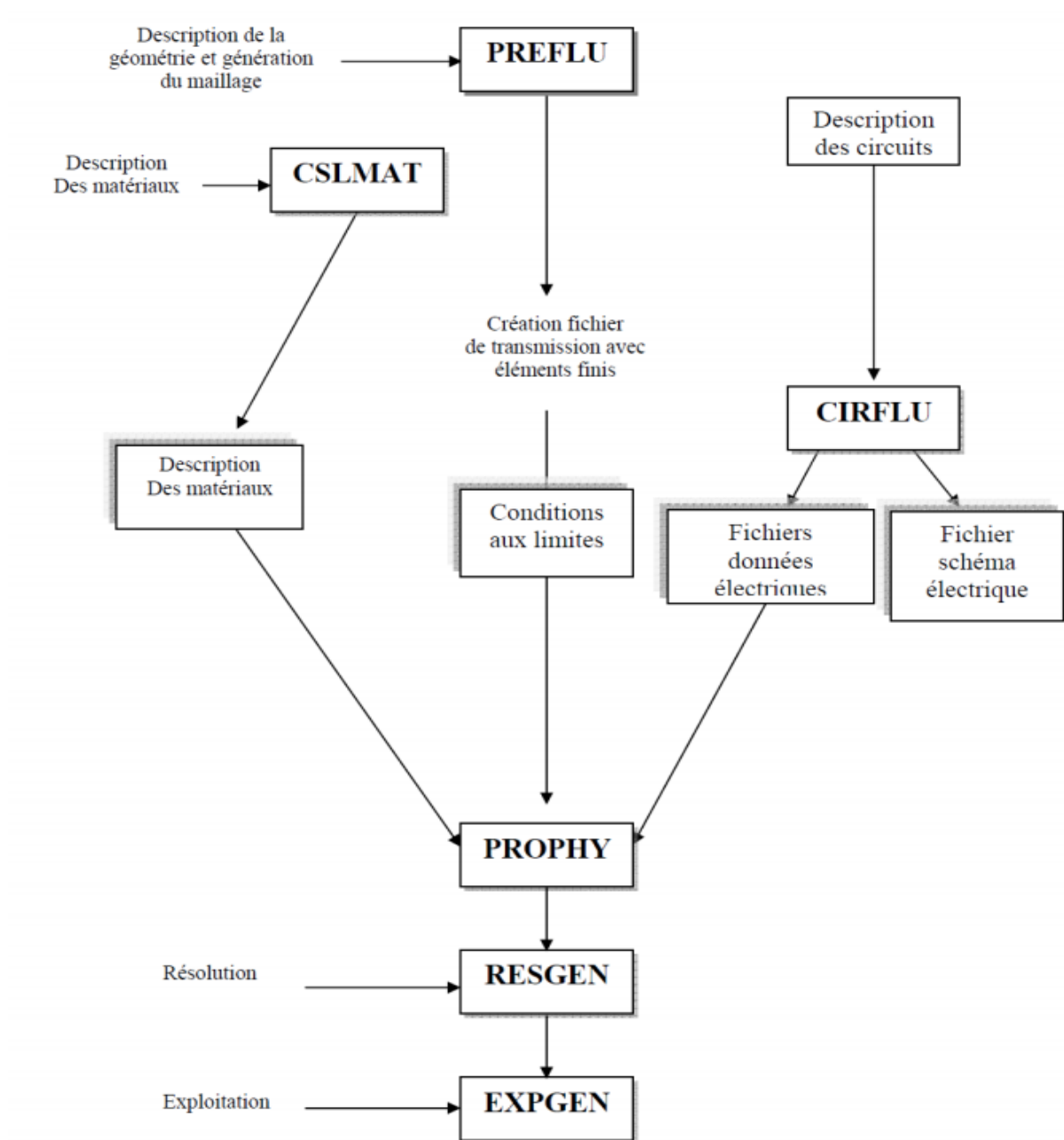


Figure 2.5 : Schéma des différents modules du logiciel Flux-2

On utilisera le logiciel flux sous sa forme 2D bien que l'inclinaison des encoches ainsi que les effets d'extrémités nécessiteraient pour une étude précise une présentation 3D. Les raisons de ce choix sont simples :

- Le temps de simulation est bien plus long encore en 3D qu'en 2D.
- L'influence de l'inclinaison des encoches n'est pas la bute principale de notre étude.

- Les effets d'extrémités sont modélisés par des inductances et résistances calculées de façon analytique. Cette méthode semble relativement précise si l'on la compare à des simulations sous Flux3D

2.13 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le modèle qui permet de prendre en compte un défaut statorique de court-circuit inter-spores d'une machine asynchrone.

Les équations de ce modèle comprennent celles relatives à la machine saine et des termes introduits par des défauts. Cette décomposition facilite la compréhension des effets induits dans les paramètres normaux de la machine suite au défaut.

Dans le chapitre suivant nous développons des simulations du modèle dans les cas sains et défaillant.

Enfin nous avons abordé la détection de défaut basé sur l'analyse spectral de courant st

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la simulation de par la méthode des éléments finis (MEF) sous logiciel Flux 2D® [36] de la machine asynchrone saine et avec défaut du court-circuit au stator :

3.2 Application à la simulation de la machine asynchrone :

On utilisera le logiciel flux sous sa forme 2D bien que l'inclinaison des encoches ainsi que les effets d'extrémités nécessiteraient pour une étude précise une présentation 3D. Les raisons de ce choix sont simples :

- Le temps de simulation est bien plus long encore en 3D qu'en 2D.
- L'influence de l'inclinaison des encoches n'est pas le but principal de notre étude.
- Les effets d'extrémités sont modélisés par des inductances et résistances calculées de façon analytique. Les autres hypothèses qu'on a considérées dans le développement de notre modèle sont :
- L'hystérésis et les pertes fer sont négligées.
- L'alimentation est purement sinusoïdale.
- Les courants entre-barres sont négligés.
- L'air autour de la machine et l'arbre ne sont pas modélisés pour cela la condition de Dirichlet ($A=0$) est appliquée sur les nœuds extérieurs du stator et celles intérieures du rotor, ce qui force les lignes de flux à être tangentes à ces deux surfaces.

La figure (3.1) illustre la répartition du bobinage dans les encoches statoriques, qui a $w_1=45$ tours par encoche

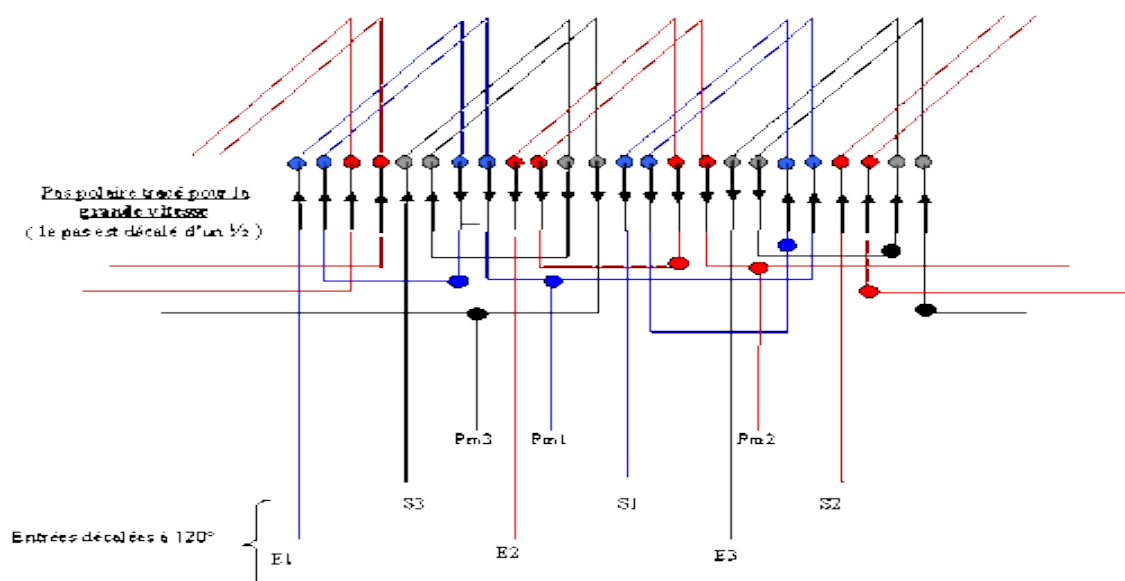


Figure 3.1 : Bobinage statorique

3.3. Les données de la machine étudiée

On obtient une machine asynchrone à partir de rembobinage de la machine asynchrone qui a les caractéristiques suivantes :

Nombre	Commentaire	Valeur
1	nombre de pôle	6
2	nombre d'encoche	36
3	nombre de barre	28
4	diamètre d'arbre	33mm
5	diamètre du rotor	109mm
6	diamètre intérieur du stator	110mm
7	diamètre extérieur du stator	168mm
8	l'entrefer	0,5mm
9	profondeur d'encoche	14,5mm
10	ouverture d'encoche	3mm
11	pas d'encoche	10°

Tableau 3.1 : caractéristiques de machine asynchrone

La figure (3.2) présente le circuit magnétique de la machine asynchrone et la répartition de ces trois phases d'alimentation sur les encoches statorique

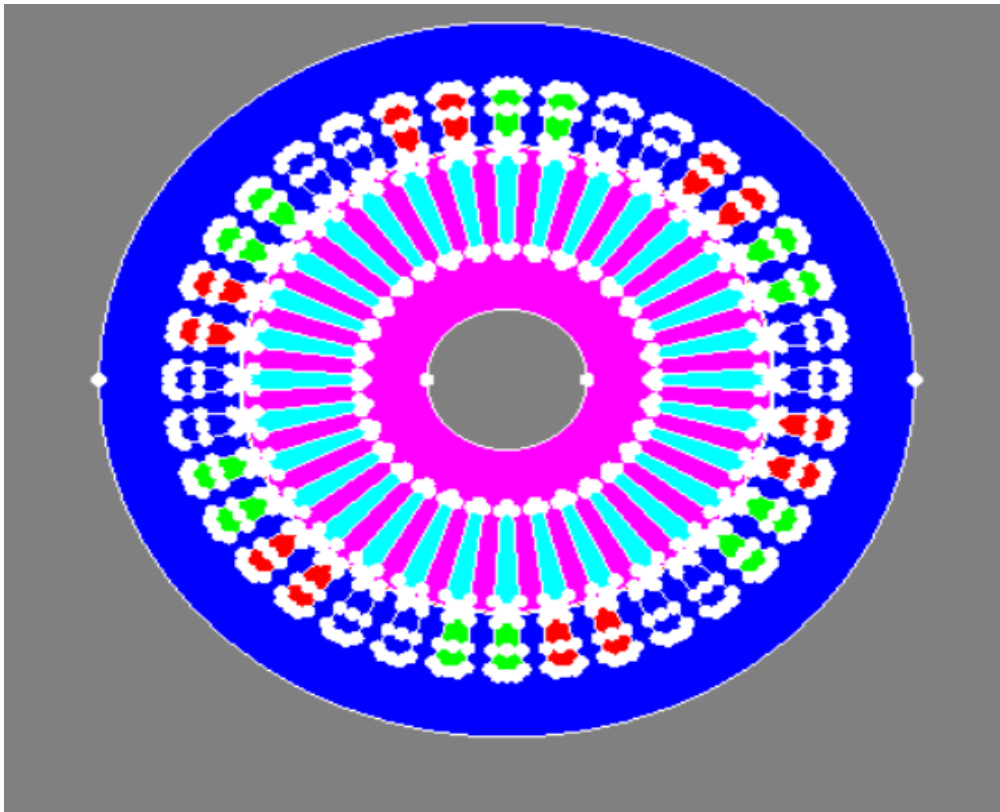


Figure 3.2 : circuit magnétique de la MAS

3.4 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'entrée 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 construites par ces lignes. Puis on construit les deux lignes intérieure et extérieure du rotor et celle extérieure de stator.

3.4.1 Génération du maillage :

Les éléments du découpage sont générés automatiquement par un générateur de maillage dans le module Preflux, mais la 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.

3.4.2 Géométrie :

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 égale à $360/36$. Pour le stator on définit une transformation du même type avec un angle égale à $360/28$. On applique la première à la surface qui représente la barre rotorique 27 fois et la deuxième à la surface de l'encoche statorique 35 fois 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 29 fois en appliquant la même transformation de l'encoche statorique. Finalement on choisit la commande Build Faces pour créer le reste des surfaces.

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

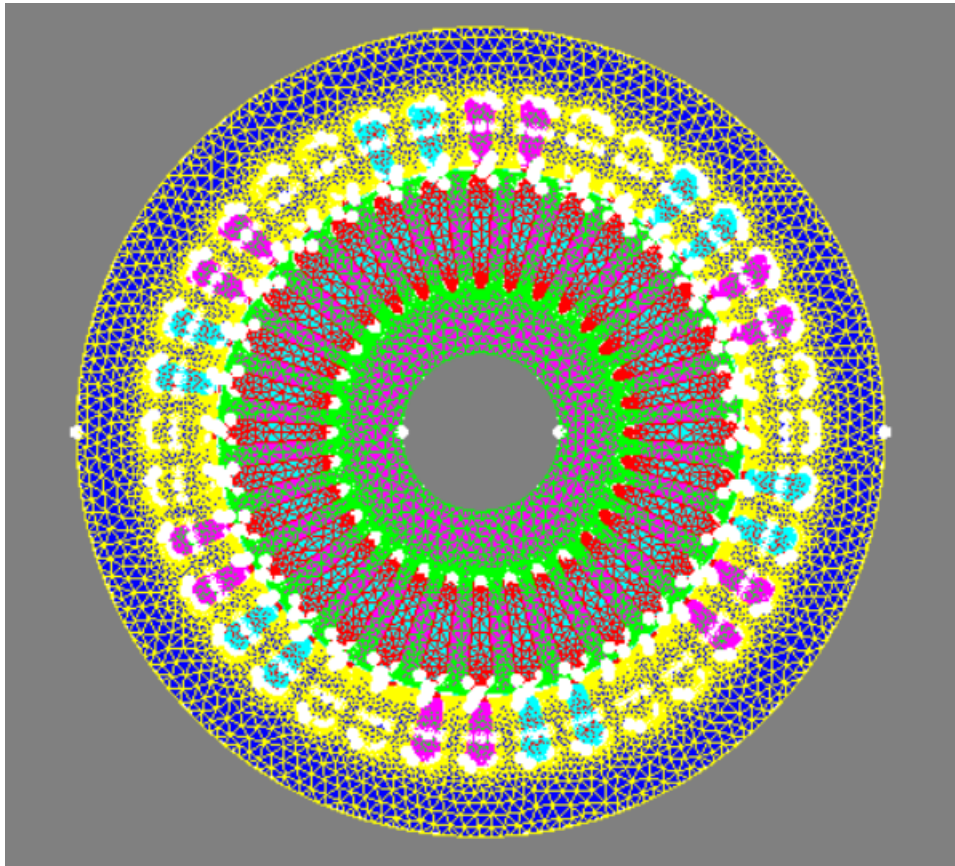


Figure 3.3 : Répartition du maillage

La figure (3.3) représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger les temps de calcul sans perte sensible d'information. La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre, lors de nos simulations nous appliquons la condition de Dirichlet sur tout le contour de la machine avec un potentiel vecteur nul [40]

3.5 Couplage avec les équations de circuit :

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 (3.4)

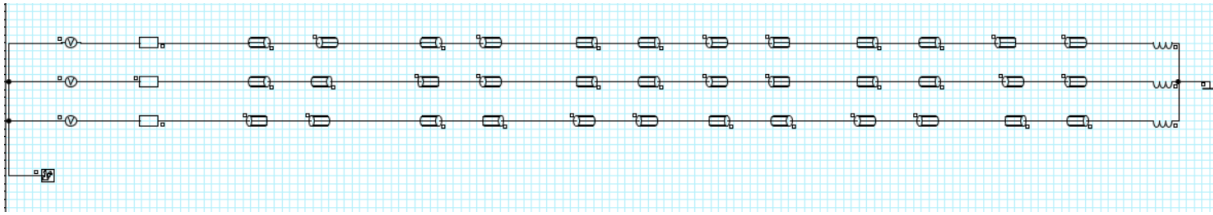


Figure 3.4 : Circuits représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie

Q1 est un macro-circuit (un dispositif du logiciel Flux 2D) utilisé pour modéliser la cage d'écureuil de la machine, c'est un circuit fermé qui contient des barres rotorique, des résistances et des inductances de fuite correspondent aux régions d'inter-barre d'anneaux de court-circuit (arcs entre deux barres adjacente) (v1, v2, v3) sont les sources de tension d'alimentation, (B1, B2, B3.....B36) représentant le bobinage statorique. (R1, R2, R3) sont les résistances de chute de tension dans le réseau. (L1, L2, L3) sont les Inductances de fuite des têtes de bobines.

3.6. Les matériaux magnétiques :

Pour ce qui est des propriétés magnétiques des matériaux ferreux, on prendra en compte la non linéarité des caractéristiques B(H) (Tableau3.2)

H [A /m]	B [T]	H [A /m]	B [T]	H [A /m]	B [T]	H [A /m]	B [T]
0	0	2000	1.61	7000	1.83	40000	2.14
300	0.66	3000	1.69	8000	1.85	50000	2.16
500	1.09	4000	1.73	10000	1.89	60000	2.18
1000	1.45	5000	1.76	20000	2.04	70000	2.192
1500	1.56	6000	1.79	30000	2.11	-	-

Tableau 3.2: B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN [34].0.9

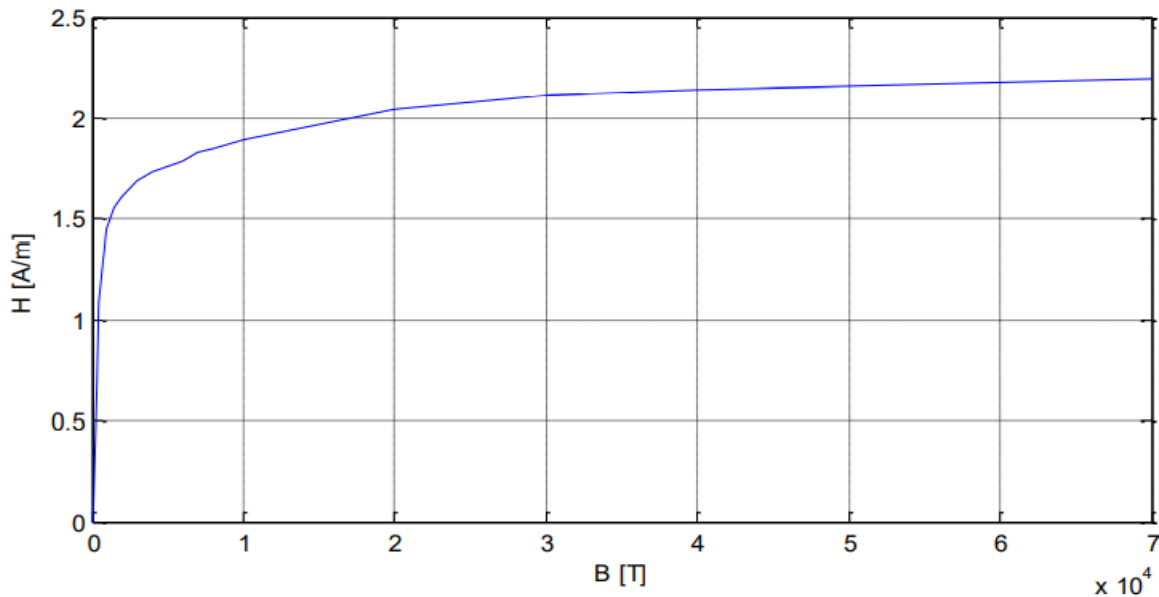


Figure 3.5 : Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.

3.7 Les propriétés physiques et régions :

Le problème étant défini par une application magnétique de 2D en magnéto transitoire (pas à pas dans le temps), auquel, le circuit électrique et les matériaux créés précédemment sont importés.

Les valeurs des résistances, des inductances, et des tensions d'alimentation, sont définies aussi ici. La prise en considération de mouvement (soit rotation ou translation) nécessite l'existence des ensembles mécaniques, ces derniers sont de trois types :

- Fixé : définit les parties fixes du modèle.
- En mouvement : définit les parties du modèle qui sont en mouvement.
- Compressible : définit les régions entre les parties fixes et celles en mouvement.

Dans notre modèle les trois types existent, le stator présente la partie fixe, le rotor est en mouvement (rotation suivant un axe parallèle à Oz) et l'entrefer est compressible.

Le couplage entre la géométrie du modèle et le circuit d'alimentation est effectué par la création des régions surfaciques, chacune de ces régions est définie par son nom, son type, matériel, l'élément électrique correspondant dans le circuit, le sens du courant et l'ensemble

mécanique. Puis ces régions sont associées aux surfaces de la géométrie par la commande (assign regions to faces)

La rotation est réalisée par la considération d'une bande de mouvement. A chaque instant le rotor est déplacé par un certain angle. La seule partie de la géométrie qui sera remaillé est la bande de mouvement qui couple les éléments du rotor avec ceux de stator.

Dans notre cas la bande de mouvement est constituée par la région de l'entrefer.

3.8 Caractéristiques de simulation :

Dans ce mode de fonctionnement, il faut déterminer les valeurs de la fréquence d'alimentation et du glissement. On utilisera le couplage avec les équations de circuit qui permettent de simuler le court-circuit de la cage. On rappelle les avantages et limiter de la magnétodynamique, [39]

Avantage :

- Simplicité de mise en œuvre
- Gain de temps et d'espace mémoire par rapport à la résolution évolutive
- La prise en compte des courants induits.

Inconvénients :

- Utilisation possible uniquement pour le régime permanent
- Toutes les grandeurs sont supposées sinusoïdales dans le temps et à même fréquence.

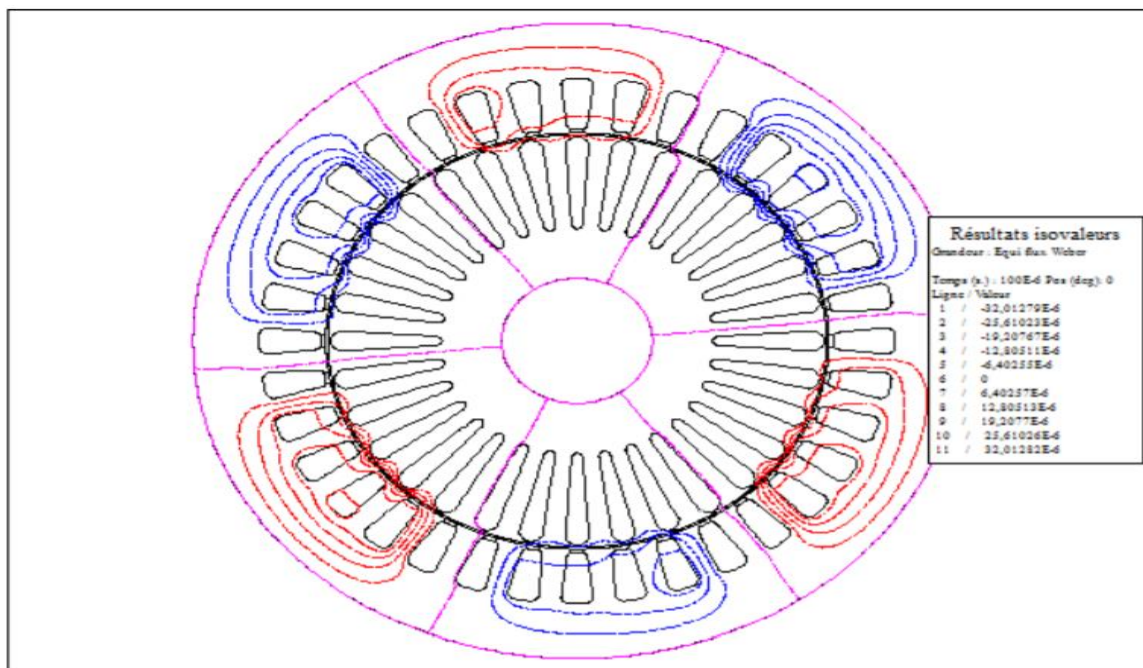
Le mouvement du rotor n'est pas « physiquement » pris en compte. Cela aboutit à des courants statoriques parfois déséquilibrés car les harmoniques des espaces ne sont pas prises en compte. Les simulations magnéto-harmoniques de Flux2D® de la machine asynchrone sont effectuées pour des valeurs constantes de glissement (valeurs constantes de vitesse rotoriques)

3.9 Simulation des comportements de la MAS :

Le but de cette simulation est de valider le modèle adopté de la machine asynchrone, et d'analyser le comportement lorsque la machine est en état sain pour faire une comparaison avec l'état défaillant par la méthode de FFT pour la diagnostic le défaut de court-circuit entre spire.

3.9.1Etat sain de la MAS

Résultats graphique



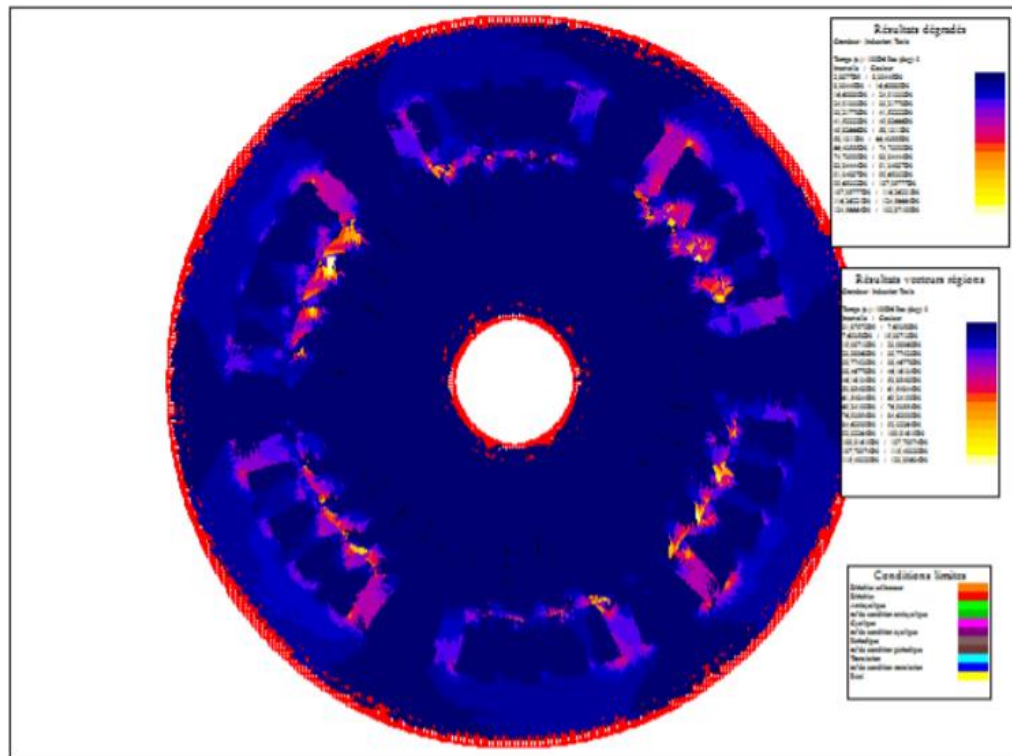
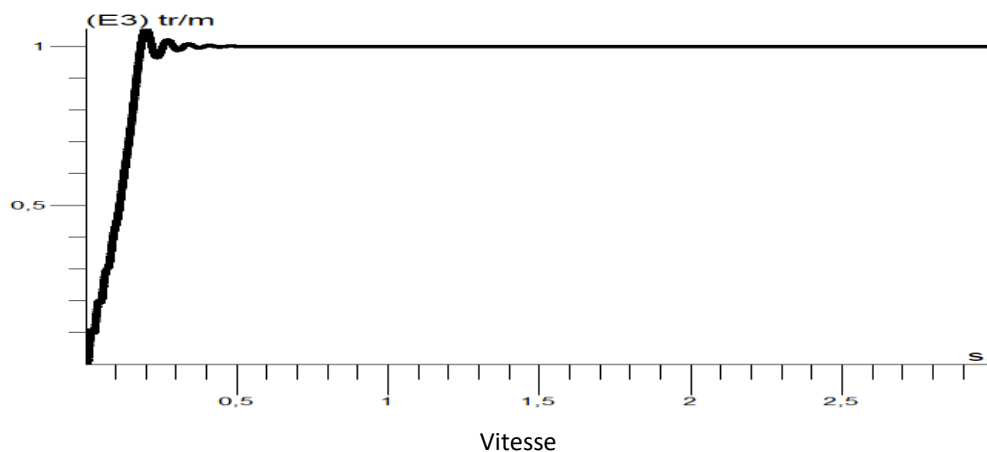


Figure 3.6 : Répartition des lignes équiflux

Nous remarquons bien la présence trois paires de pôles, La distribution des lignes est quasi symétrique par rapport aux axes des pôles. Les lignes de flux entre le stator et le rotor sont Légèrement déviés dans le sens de rotation du rotor. La répartition de l'induction est, elle aussi, quasi-symétrique, nous remarquons que le courant dans les barres au démarrage est plus grand a celui au fonctionnement nominal

3.9.1.1 sain auid



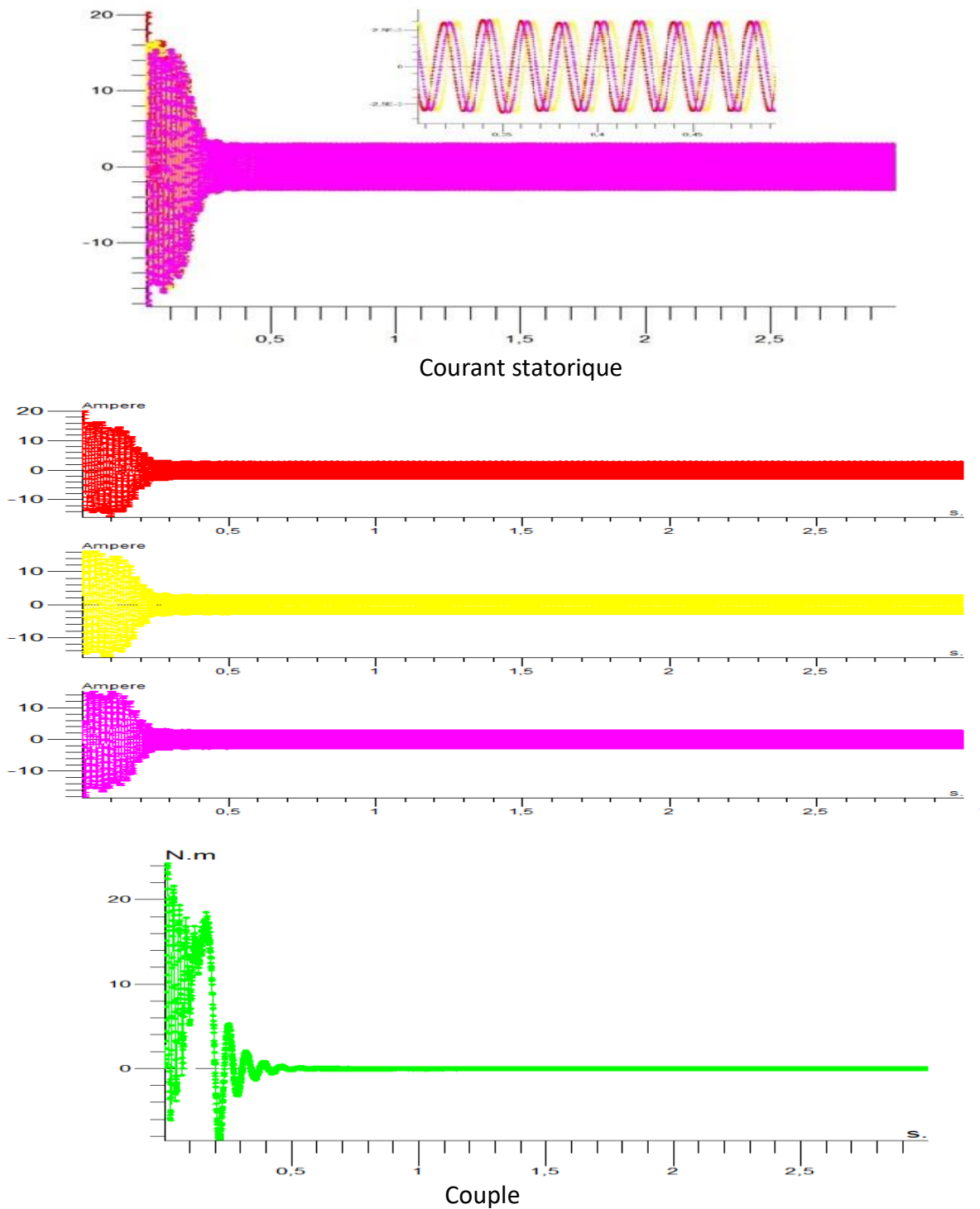


Figure 3.7 : résultat des grandeurs électromécaniques en régime sain auid

Interprétation de la simulation :

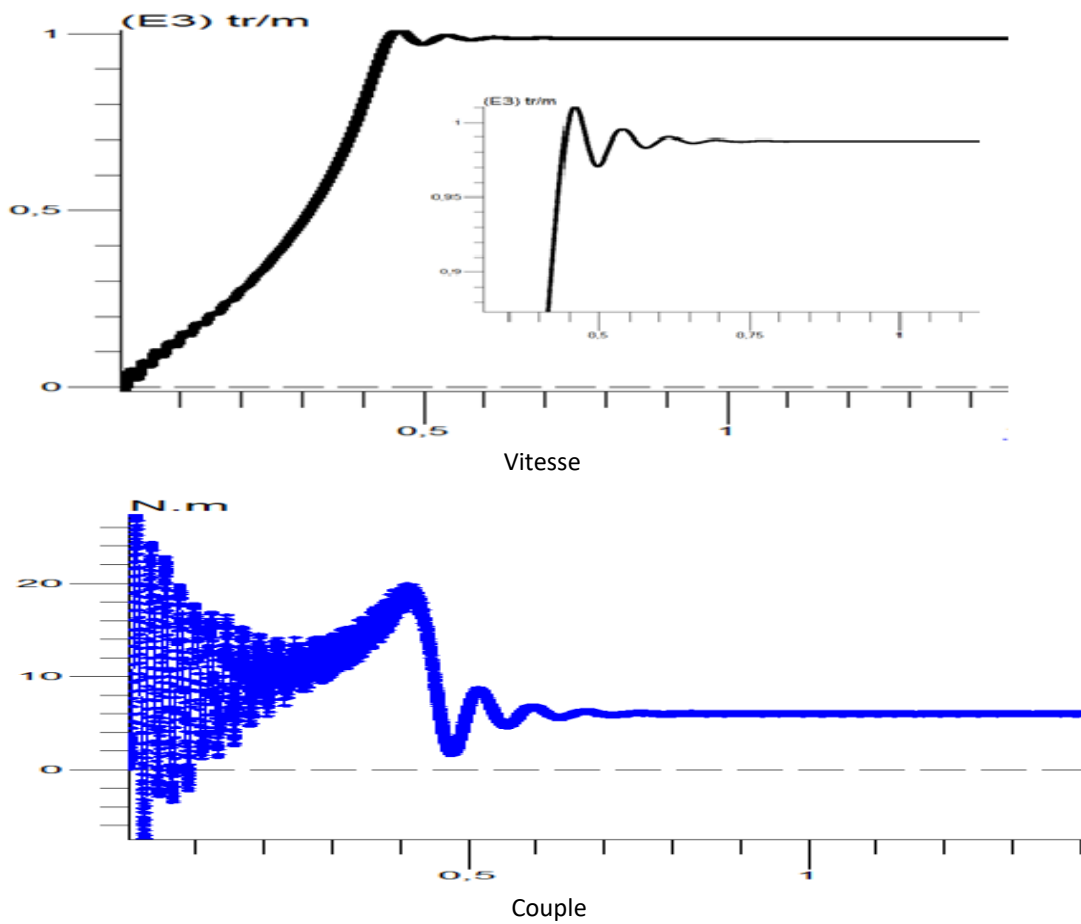
Le couple admet une forte valeur (fort appel de courant au démarrage, bref mais important) avec des oscillations puis se rétablit à zéro (charge nulle) .

L'allure de la vitesse présente des oscillations dans les premiers instants de démarrage avec un accroissement presque linéaire. Le régime établi est atteint au bout de (0.6s).

Le courant de démarrage est excessif et est dû à l'appel de puissance pour pouvoir démarrer la machine. Ces pulsations de courant disparaissent au bout de quelques alternances pour donner une forme sinusoïdale d'amplitude constante.

3.9.1.2 sain en charge

Sain avec charge $C_r=6n*m$



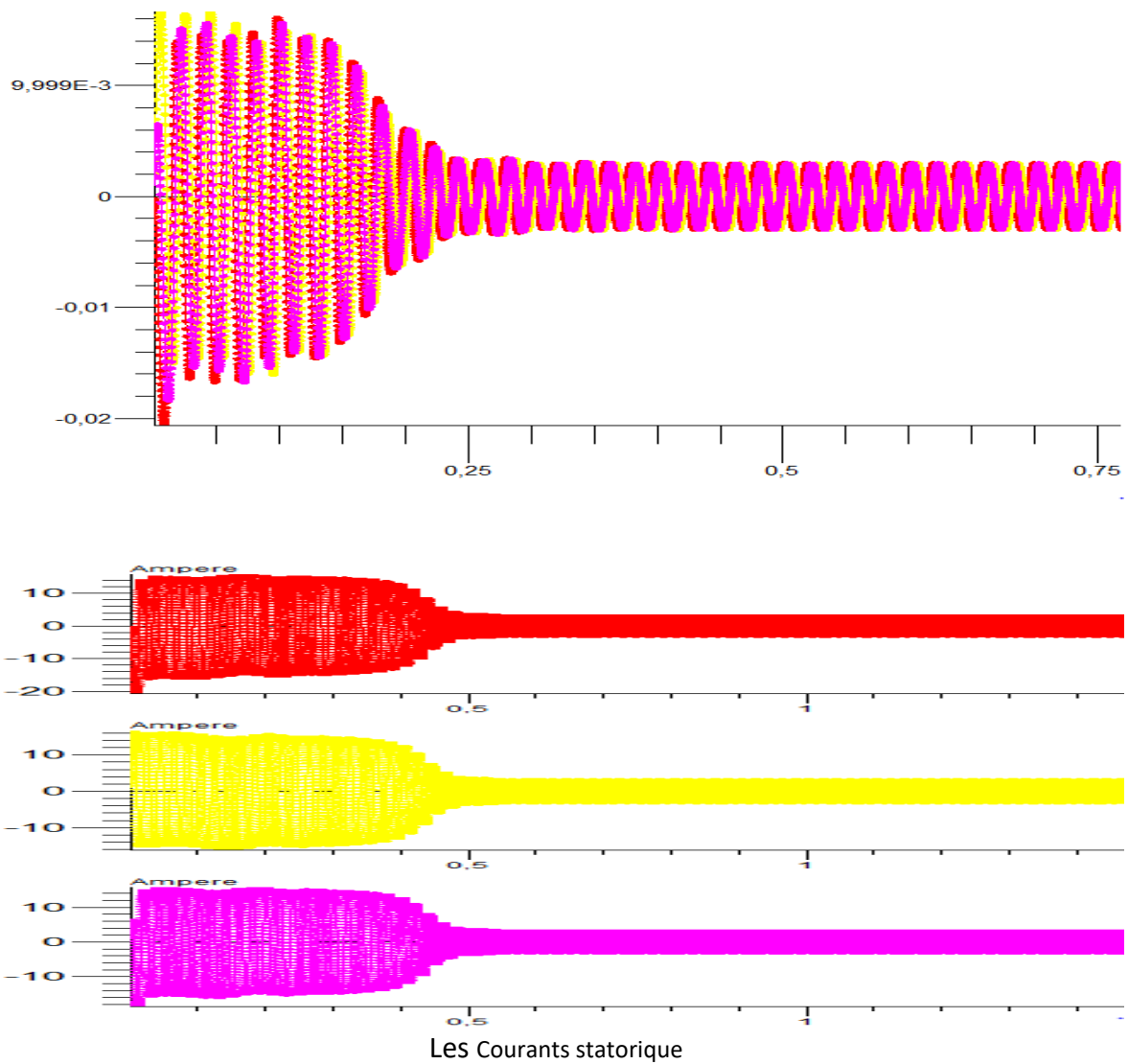


Figure 3.8 : résultat de simulation des grandeurs électromécaniques en régime sain en charge

Interprétation des résultats :

Lors de démarrage, on constate des pics de courants importants qui s'atténuent avec l'évolution du régime transitoire.

L'allure de la vitesse présente des oscillations dans les premiers instants de démarrage avec un accroissement presque linéaire, ensuite la vitesse se stabilise à la valeur nominale 1000

[tr/min]. En appliquant une charge à l'instant $t=0s$, on constate une légère diminution de vitesse. Ainsi l'évolution du couple électromagnétique en fonction du temps. Au premier instant du démarrage, le couple électromagnétique est fortement perturbé à cause du moment d'inertie, il atteint la valeur (6 N.m).

L'application de la charge qui se traduit par l'apparition d'une valeur qui correspond au couple appliqué.

Le courant statorique en fonction du temps, répond au classique appel du courant en démarrage qui égale à 9 fois environ le courant nominal. Au démarrage le courant statorique est très important, vu qu'il est de courte durée, la machine pourrait le supporter sans risquer un échauffement dangereux. Cette valeur de courant due au régime transitoire disparaît au bout de quelques alternances afin d'obtenir une forme sinusoïdale d'amplitude constante. A l'instant $t=0s$, on constate que le courant statorique augmente à cause de l'augmentation du couple résistant (charge).

3.9.2 Etat défailante de la MAS (court-circuit entre spire):

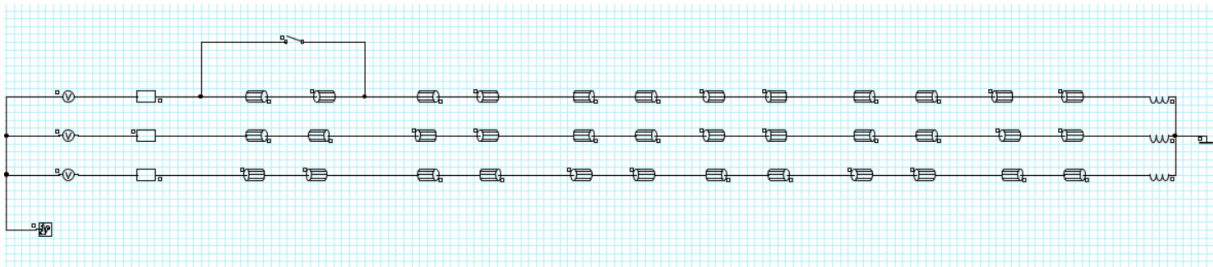


Figure 3.9 : circuit équivalent en présence de défaut

Résultats graphique

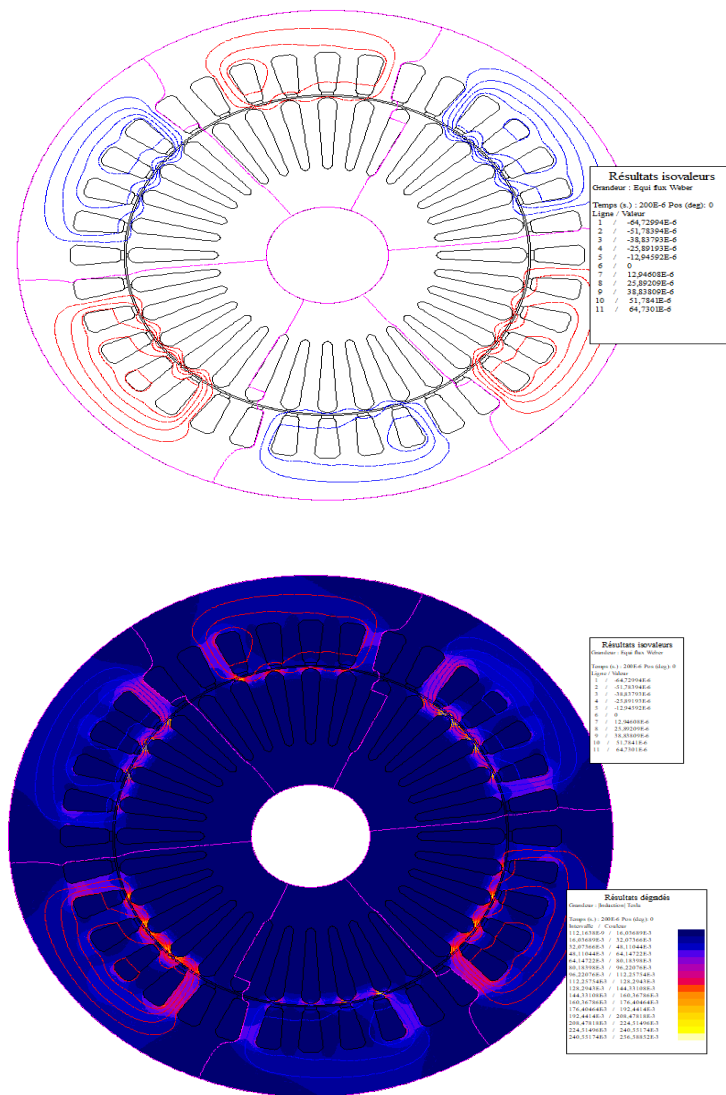
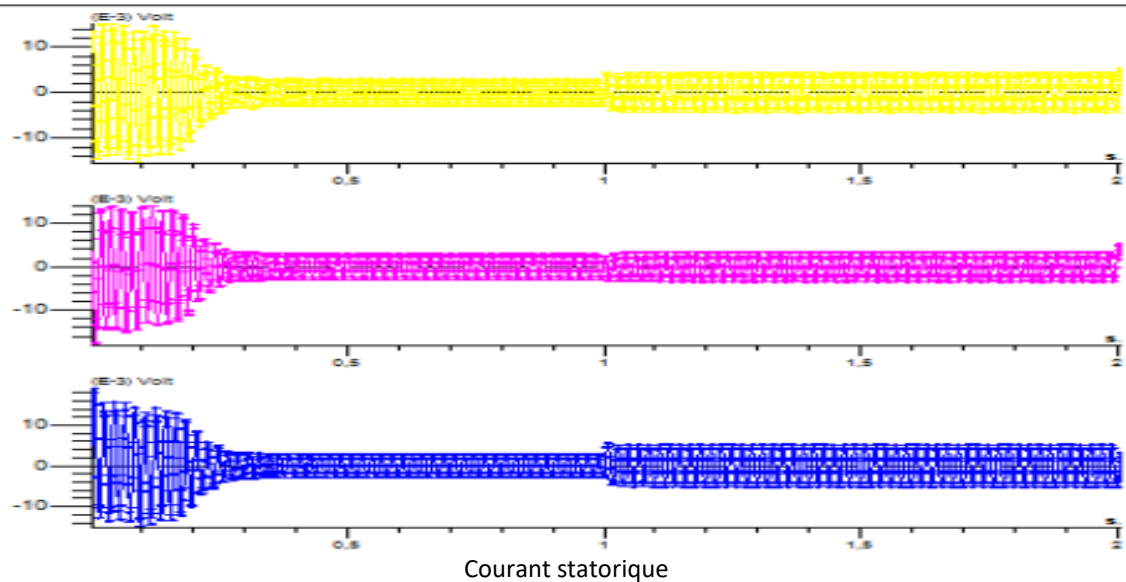
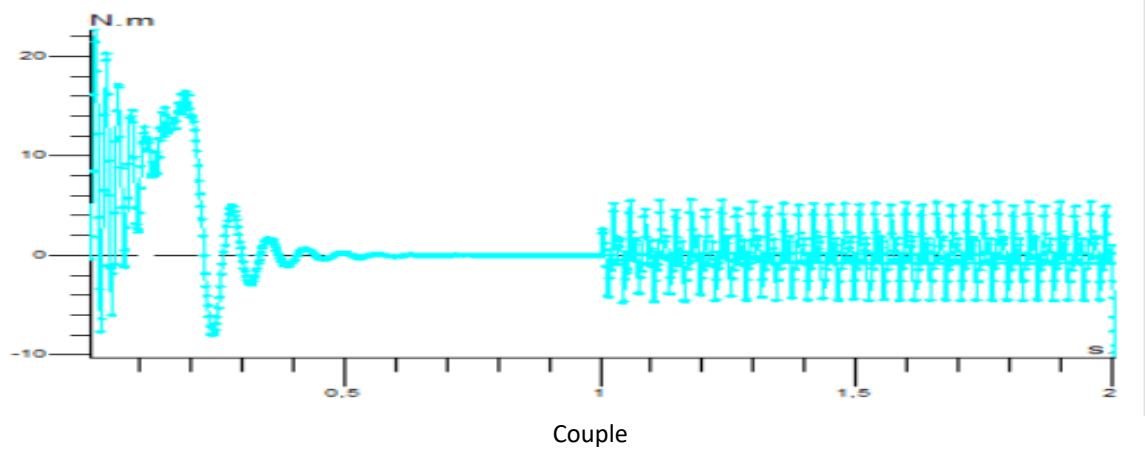
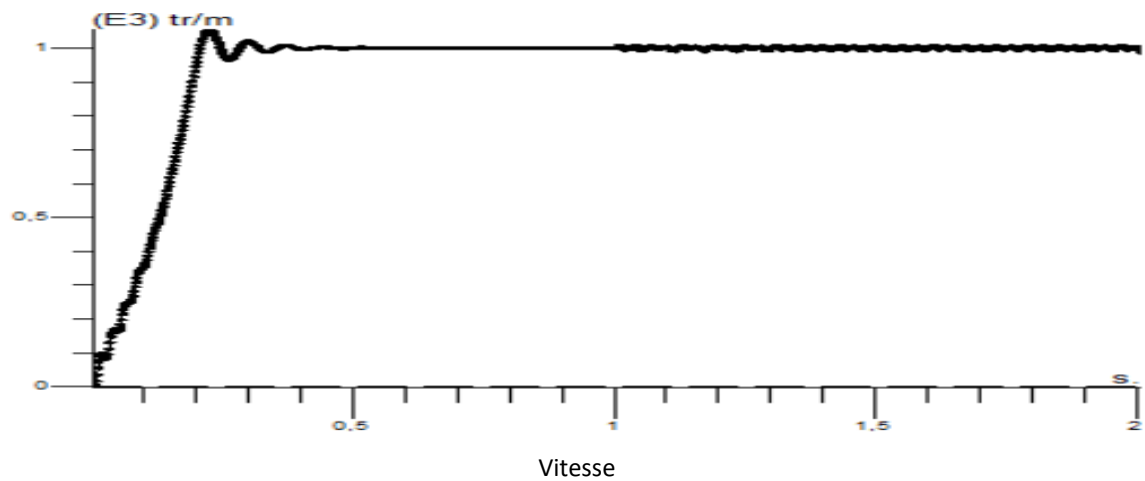


Figure 3.10: Répartition des lignes équiflux

On remarque la distribution des lignes de flux dans la machine qui fait apparaître le déséquilibre provoqué par le court-circuit entre spire.

3.9.2.1 état défaut à vide de la MAS



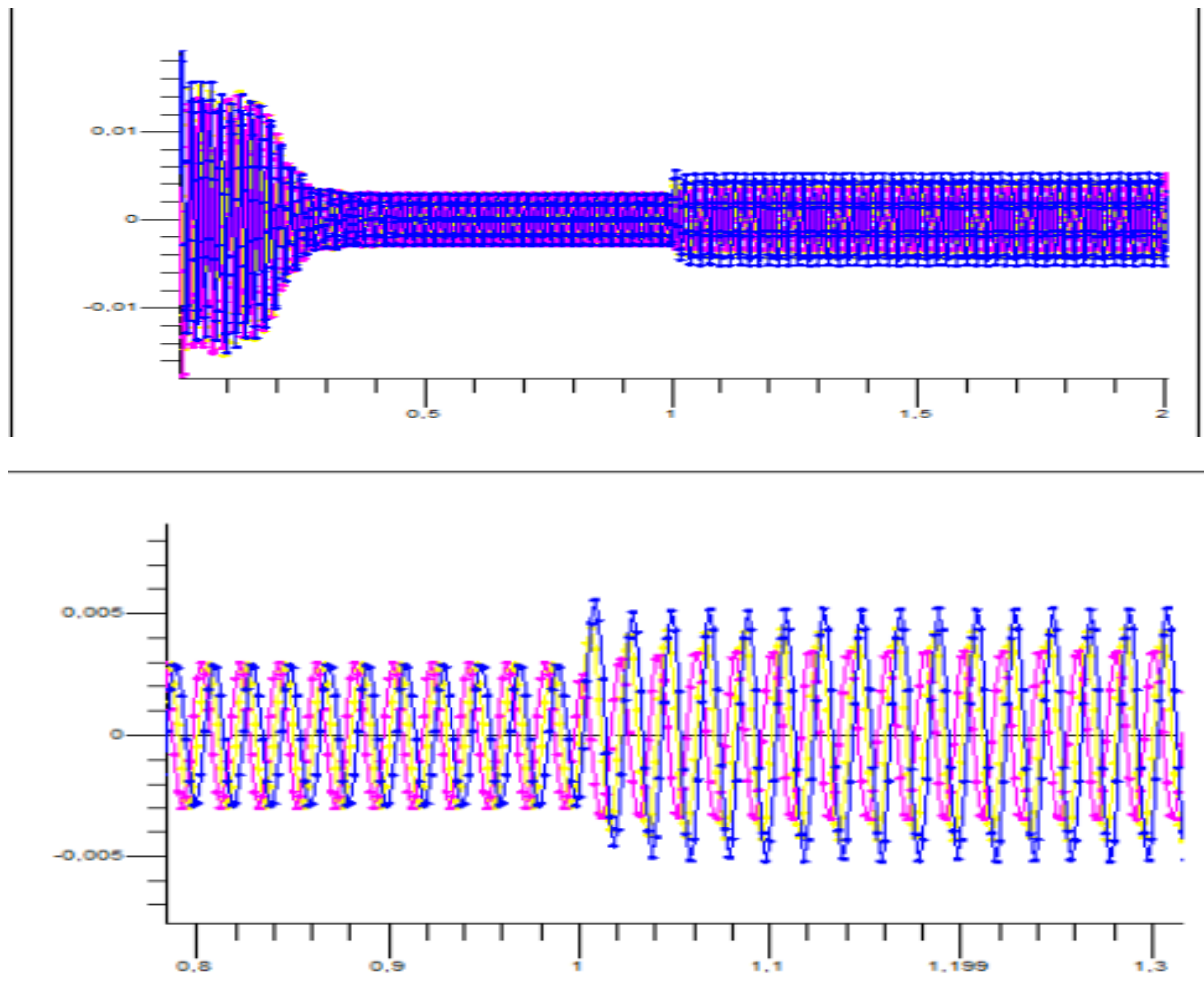
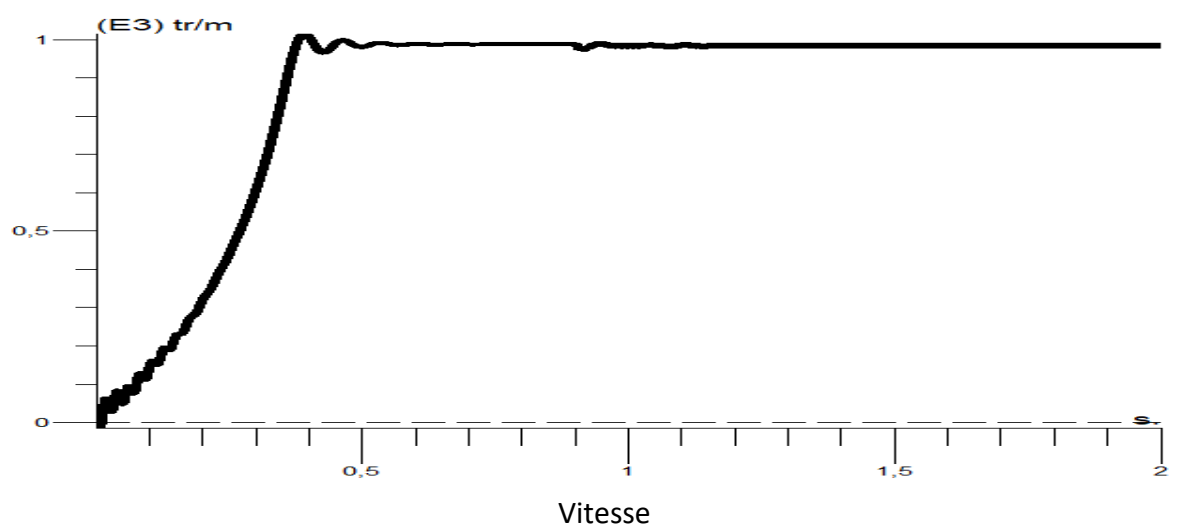
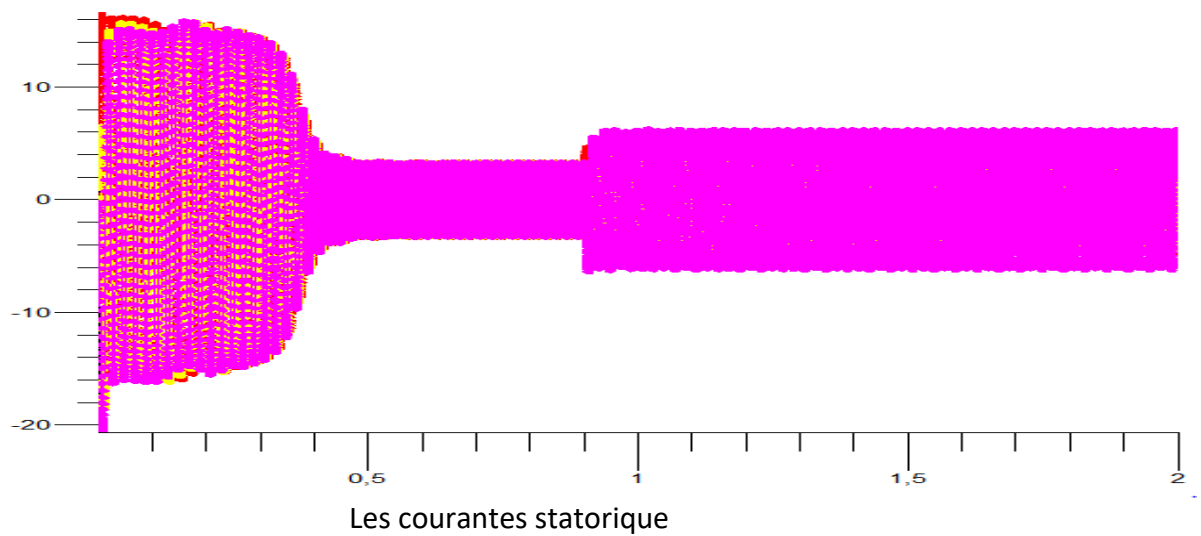
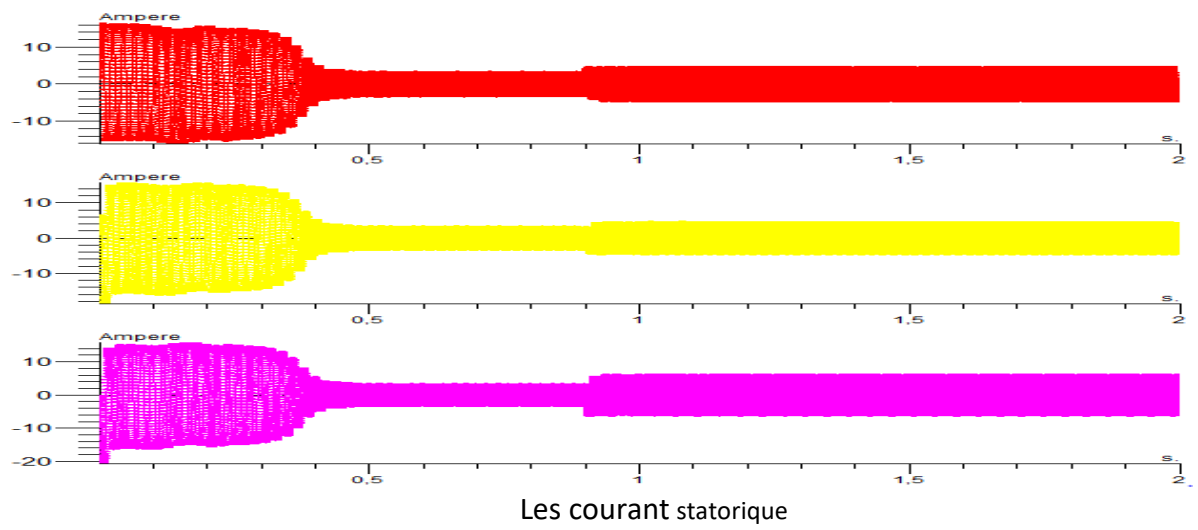
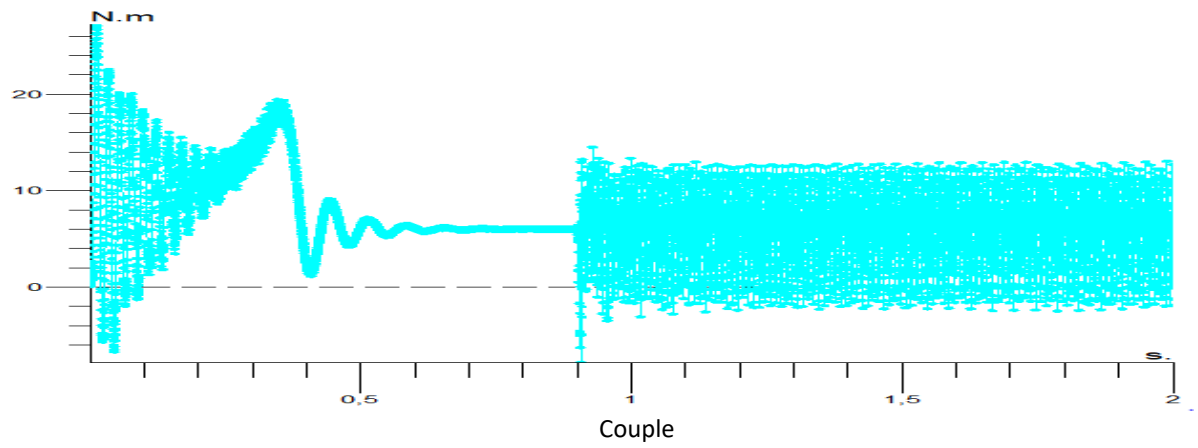


Figure 3.11: résultat des grandeurs électromécaniques en régime défaillement avar

3.9.2.2 1 état défaut en charge de la MAS





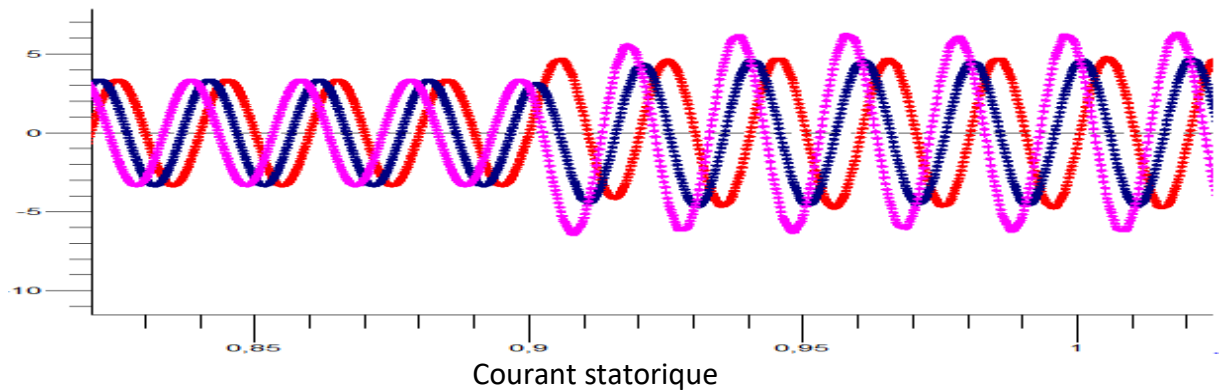


Figure 3.12: résultat des grandeurs électromécaniques en régime défaille en charge

Interprétation des résultats :

Nous constatons que l'amplitude du courant dans la phase présentant un c-circuit est supérieure aux courants des autres phases. Toutefois, les courants qui parcourent ces phases sont amplifiés par rapport au cas du moteur sain. Cette amplification est fonction du nombre de spires en court-circuit.

Nous constatons une augmentation proportionnelle au défaut des amplitudes des courants rotoriques par rapport au cas sain.

D'autre part, le facteur de puissance global décroît avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit. Ceci peut être interpréter par la modification de la distribution du bobinage, qui introduit une variation de l'inductance propre de la phase concernée par le défaut et affecte les autres phases par couplage magnétique.

Concernant les oscillations de la vitesse de rotation, elles augmentent avec le nombre de spires en court-circuit.

Lors de l'application d'un défaut de court-circuit, le couple électromagnétique possède une valeur moyenne à peu près égale au couple développé par la machine saine mais en présentant des bruits qui prennent de l'importance au fur et à mesure que le court-circuit devient important.

Les résultats nous montrent clairement que l'analyse directe du courant s'avère très difficile puisque, comme nous voyons, la modulation de l'amplitude est très faible à observer clairement et par conséquent il donne un diagnostic faible. La pauvreté du signal temporel du courant, en renseignements nécessaires pour détecter les défauts en questions, nous amène au signal fréquentiel qui offre des informations précieuses sur sa composition.

L'analyse directe des grandeurs électriques et électromécaniques reste imprécise pour l'étude des défauts. Dans ce qui suit nous utilisons la transformée de Fourier Rapide (FFT) pour mieux quantifier les anomalies introduites par les défauts en analysant particulièrement les raies de fréquences à proximité du fondamental.

3.10 Analyse spectrale

Il est parfois difficile de se contenter uniquement sur les résultats obtenus précédemment pour détecter un défaut.

Des méthodes basées sur l'analyse spectrale des signaux constituent meilleur outil permettant d'appréhender les défauts.

L'analyse spectrale est utilisée pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les court-circuits dans les bobinages.

Dans ce travail nous avons choisis l'analyse de courant statorique en régime permanent par l'analyse de Fourier(FFT) car le spectre rend compte sur l'existence des défauts dans une machine électrique.

Les figures ci-dessus représentent respectivement les spectres relatifs aux courants statoriques en régime permanent, avec court-circuit inter-spire

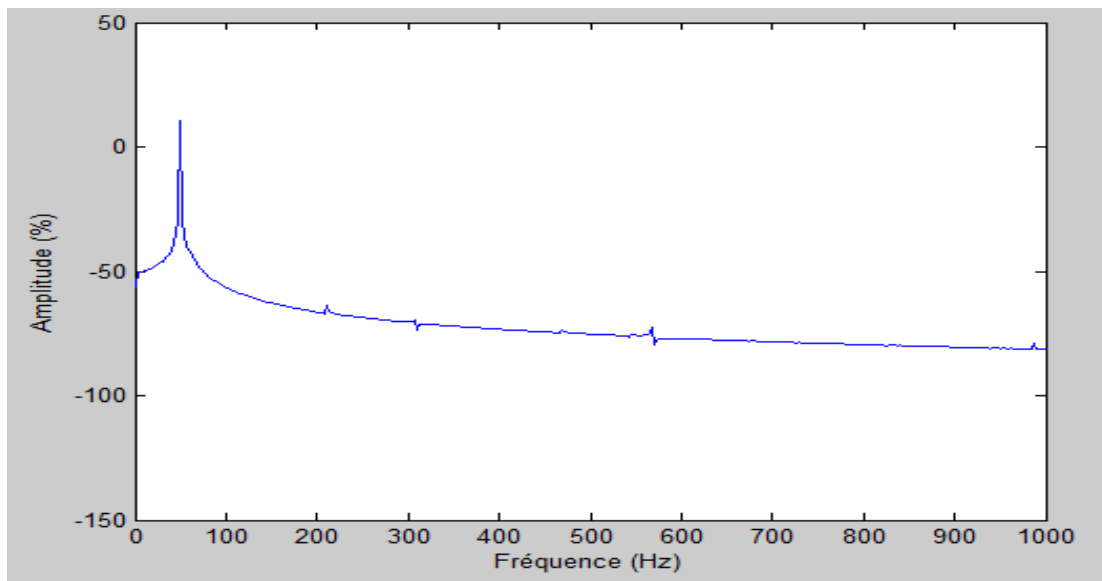


Figure 3. Le spectres du courant statorique à vide sans défaut

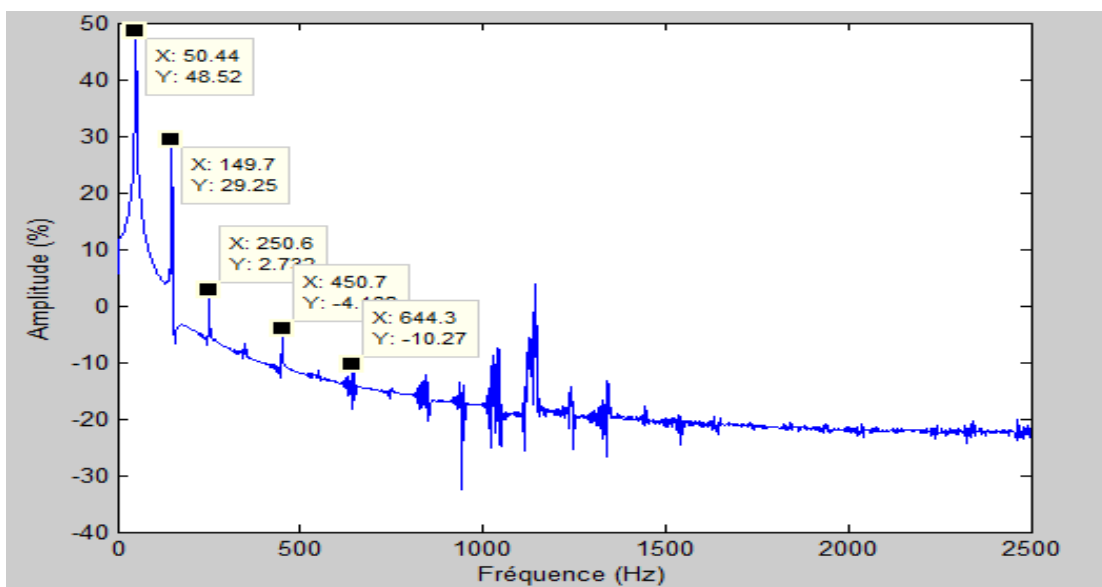


Figure3.15 : Le spectres du courant statorique à vide avec court-circuit

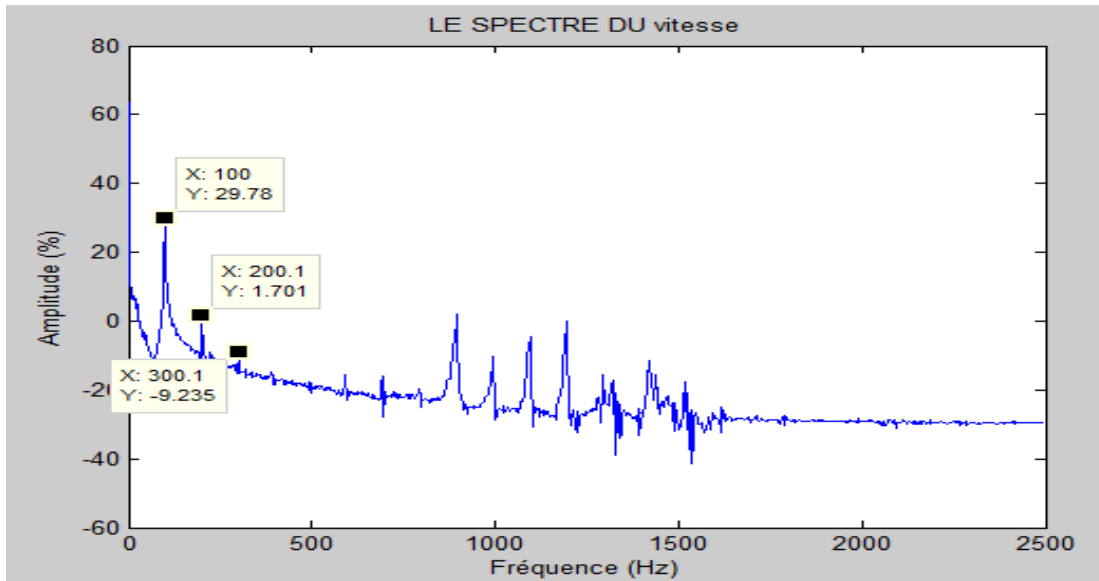


Figure4.16 : Le spectres du vitesse statique à vide avec court-circuit

Interprétation des résultats :

Une analyse spectrale du courant statorique d'un moteur défaillant fait apparaître des pics, le premier correspond à la fréquence fondamentale 50Hz.

Les autres à des pics sont multiple de ($k \cdot f_s$) avec k : nombre impaire. Qui signifient les fréquences de court-circuit.

On peut ainsi conclure que les défauts de court-circuit entre spires définissent par une forte augmentation des valeurs de l'harmonique des courants de rais

3.11. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons simulé la machine asynchrone pour les deux cas sains et avec défaut de court-circuit de spire au niveau du stator à l'aide de la modélisation par la méthode élément finis. Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé.

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel est souvent utilisée car le spectre résultant contient des informations relatives aux défauts électriques et magnétiques.

L'évaluation des harmoniques ont montré clairement que les amplitudes de ces dernières sont très influencées.

Finalement une analyse spectrale des courants statorique montre que L'analyse spectrale des signaux nous donne des renseignements, qui ne sont pas détectable sur la simulation temporelle.

Conclusion générale

La machine asynchrone est l'élément le plus utilisé et l'un des plus importants dans les systèmes électriques, sa surveillance et son diagnostic ont fait et font toujours l'objet de Plusieurs études.

Notre travail est basé sur la détection des défauts de la machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil en utilisant des modèles à élément finis.

Dans ce contexte, le mémoire comporte trois chapitres qui sont organisés comme suit :

Au début de ce travail, nous avons rappelé de la machine asynchrone triphasée à cage et les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement, ainsi que ses origines. Puis, nous avons présenté un état de l'art des différentes techniques de surveillance des machines asynchrones.

Contrairement à la plupart des études analytiques de diagnostic nous avons développé un modèle à base d'éléments finis, sous logiciel Flux 2D, permettant de représenter différents défauts pouvant survenir lors d'un fonctionnement normal. Ces modèles a permis de mettre en évidence l'effet des défauts sur le fonctionnement de la machine, les signatures associées à chaque défaut et de tracer les éventuelles évolutions des pannes électriques qui peuvent être générées suite à ces anomalies.

Enfin nous avons abordé à la détection de défaut de court-circuit être spire en utilisant la méthode de l'analyse spectrale du courant statorique (FFT), nous avons constaté l'efficacité de cette méthode dans le domaine de diagnostic.

Dans le deuxième chapitre, on a commencé par la présentation de modèle mathématique de la MAS en triphasée, puis on a procédé aux transformations dans les différents repères de Park, ce qui aboutit aux modèles simplifiés.

Finalement une analyse spectrale des courants statorique montre que L'analyse spectrale des signaux nous donne des renseignements, qui ne sont pas détectable sur la simulation temporelle

Références Bibliographiques

- [1] : M. Laamayad Tahar, « Commande Optimale d'une Machine asynchrone Apport de La Logique Floue » mémoire Magister, Université de Batna ,2008
- [2] : Rabah BELHADEF Et Bilal BOUTAYA, « Commande Vectorielle et par Logique Floue de la Machine Asynchrone Sans Capteur » mémoire D'Ingénieur d'Etat , Ecole Nationale Polytechnique, 2008
- [3] : Ferhat. Hadjer « Commande adaptative floue d'un moteur Asynchrone » mémoire de master, université de Mohamed Boudiaf- M'sila 2016
- [4] :Elbia.Youcef, « Commande Floue Optimisée d'un Machine Asynchrone a Double Alimentation et à Flux Orienté », mémoire de Magister, Université de Batna ,2009.
- [5] : Chekima Djamel, «Commande d'une Machine Asynchrone par Logique Floue», mémoire master ,Université d'EL-Oued, 2014.
- [6] : Sabour.K, Elazazi.S, « Commande vectorielle da la machine asynchrone à double alimentation » mémoire master, université AKLI Mohaned Oulhadj de Bouira, année 2015.
- [7] : Bayla Bapio, « la machine asynchrone », Site internet, «demo.2ie-edu.org», avril2018
- [8] : Cherier.F, Amade. G, « Modélisation en vue du diagnostic des défauts dans une machine asynchrone » mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université M'hamed Bougara-Boumerdès, 2009.
- [9] :E. Gaucheron, «Les moteurs électriques... pour mieux les piloter et les protéger», <http://www.schneider-electric.com>,avril2018
- [10] : Hakima Cherif, « détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisent l'analyse par FFT et ondelettes » mémoire de magister, Université mohamed khider biskra, 2014
- [11] : Hamadou.A, Nessissen.A, « Modélisation numérique d'un moteur Asynchrone à cage d'écureuil» mémoire master, Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana, 2015.
- [12] : Site internet, WWW.MELEEC.ORG, extraie Mars 2018
- [13] : Alain Charbonne, « Le moteur asynchrone triphase », Site internet «<https://sti.discip.ac-caen.fr> » avril2018

[14] : Henry Ney, « Électro système-1ère SIT » livre, édition technique 1997.

[15] : Claude Chevas, Grégory Valentin, « Machine asynchrone », cours et problèmes, version du 21/09/2014.

[16] : Theodor.W, Gilbert.S, « Electrotechnique » livre, 3ème édition, 1999. Bibliographie

[17] : Z.Ait Ouali, , « Application de FPGA à la commande d'un moteur asynchrone » mémoire magister, université Mouloud Mammerie de Tizi-Ouzou ,2015.

[18] G. Barakat « Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone à cage en présence de défauts ». Article de synthèse des travaux de huit laboratoires dans l'opération " Détection de Défauts et Diagnostic des Actionneurs" du thème "Sûreté - Fiabilité", Revue Internationale de Génie Electrique(RIGE), 2005.

[19] Laleg Taous Meriem «Contribution aux Méthodes de Diagnostic à Base d'Observateurs et à la Commande Tolérante aux Défauts Application à la Machine Asynchrone et au Robot SCARA » Mémoire d'ingénieur, Laboratoire de Commande des Processus Ecole Nationale Polytechnique. Algérie, juin 2004.

[20] François Monchy «maintenance » méthode et argonisations DUNOD.

[21] Boumegoura Tarek «Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic » thèse de doctorat préparée au sein de l'école électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, 2001.

[22] A. H. Bonnett, G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three phase squirrel cage induction motors" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.28 no.4, pp 921-937, Aug 1992.

[23] O. Ondel « Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur

machine asynchrone ». Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2006.

[24] R. N. Andriamalala, H. Razik, L. Baghli, F-M. Sargos, "Eccentricity Fault Diagnosis of a Dual-Stator Winding Induction Machine Drive Considering the Slotting Effects", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 55, Issue 12, , pp. 4238 – 4251, Dec. 2008.

[25] G. DEDIER «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ». Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2004.

[26] H. Razik, G. Didier « notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone ». Notes de cours, I.U.F.M. de Lorraine, Maxeville, 7 janvier 2003.

[28] H. Razik « le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de défaillance ». p 48-52, 29-juin 2002.

[29] M. OUADAH. "Modélisation et Diagnostic des Défautes des Machines Asynchrones à Cage D'écureuil par L'approche des Circuits Multiples Couplés Magnétiquement en Tenant Compte des Harmoniques D'espace «, Thèse de magister, Ecole nationale polytechnique d'Alger, Décembre 2008.

[30] A. H. Bonnett, "Root Cause AC Motor Failure Analysis with a Focus on Shaft Failures", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 5, September/October 2000.

[31] H. Razik, « La machine asynchrone à vitesse variable: capteurs, modèles, contrôle et diagnostic », Editeur Hermes Science, 2006.

[32] R. Casimir, E. Bouteleux, H. Yahoui, G. Clerc, H. Henao, C. Delmotte, G.-A. Capolino, G. Houdouin, G. Barakat, B. Dakyo, G. Didier, H. Razik, E. Foulon, L. Loron, S. Bachir, S. Tnani, G. Champenois, J.-C. Trigeassou, V. Devanneaux, B. Dagues, J. Faucher, G. Rostaing and J.-P. Rognon, "Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone à cage en présence de défauts", Journal RIGE, vol. 8, no 2/2005, pp. 287-300, 2005.

[33] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini & C. Tassoni, "Towards a correct quantification of induction machines broken bars through input electric signals", ICEM'00, Finland, pp. 781-785, 28-30, aug. 2000.

[34] B. Raison, "Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique" Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 2000.

[35] G. Didier, E. Ternisien, O. Caspary, H. Razik, "A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis", Journal of Mechanical Systems and Signal Processing (MSP), vol. 21, n° 2, pp. 1127-1142, Feb.07.

- [36] L. Baghli, L. Hein, H. Razik & A. Rezzoug, "Modelling rotor cage induction motors for default detection", IEEE International SDEMPED'97, France, pp. 41-47, Sep. 1997.
- [37] B. Vaseghi, N. Takorabet, and F. Meibody-Tabar, "TRANSIENT FINITE ELEMENT ANALYSIS OF INDUCTION MACHINES WITH STATOR WINDING TURN FAULT" Progress In Electromagnetics Research, PIER 95, 118, 2009
- [38] HAMMACHE Hakim "Etude et réalisation d'une machine asynchrone a cage: conception, alimentation et commande " Thèse de Magister, école militaire polytechnique, 2007
- [39] HAMDOUNE Tarek "Evaluation Des Pertes Magnétiques Dans Une Machine Asynchrone Double Etoile Alimentée Par Onduleur De Tension " Thèse de Magister, école militaire polytechnique, 2009.
- [40] X. Luo, Y. Liao, H.A. Toliyat, A. El-Antably, and T.A. Lipo, "Multiple coupled circuit modeling of induction machines," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 31, no. 2, March/April 1995, pp. 311-318.
- [41] M. H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys, "Induction motors faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques," IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 14, no. 1, January 1999, pp. 14-22.
- [42] A. Abed, "Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone," Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, mars 2002.
- [43] : BAZINE Sadok ; (Conception et implémentation d'un méta-modèle de machines asynchrones en défaut) ; thèse de doctorat ; Université de Poitiers ; Année 2009.
- [44] : BOUSBIA Salah Mohamed, DJERIBIAI Ayoub, BOUAZIZ Salim ;(Identification des machines asynchrones par la méthode SSFR vue de leur diagnostic) ; diplôme d'ingénieur d'état ; Université de M'silla ; Année 2011/2012
- [45] :M. Bouray Islam , Réalisation de cas de démo Flux accessibles depuis superviseur, Master Ingénierie Electrique Electronique et Informatique Industrielle Spécialité « Energie électrique , Université de Lorraine Faculté des Sciences et Technologies, 12/09/2014.
- [46] : J. A. Farooq, Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents, thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Monbéliard, 2008

[47] :y.Boutra,Elabortion(de nouvelles méthode de rémunération des maillages en vue d'une modélisation électromagnétique des machine synchrone a aiment permanâtes avec la méthode des éléments finis),thèses de doctorat , ENP, Alger,2007