

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE

L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

DOMAINE : SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES

FACULTE: TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : ELCTROMECHANIQUE



DEPARTEMENT: GENIE  
ELECTRIQUE

MEMOIRE FIN D'ETUDE EN  
VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME DE MASTER

**Contribution au diagnostic de la machine  
asynchrone par une méthode non invasive**

Proposé et dirigé par :

- Dr. Assam ZORIG

Présenté par :

- SAMIR ALI

- CHATRA ABDENNOUR

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2021/2022



# Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage et la patience durant toute la période de réalisation de ce mémoire.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur M. ZORIG Aissam, pour son suivi continu tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et remarques.

Enfin, je ne remercie également toute personne qui m'a donné de l'aide pendant cette phase de réalisation de ce mémoire et tous mes collègues de la promotion 2021/2022.

Nos remerciements sont destinés aussi à toutes nos familles, et tous nos amis pour leur aide et leur soutien.



# Dédicasse

Je dédie cette œuvre à la première personne de ma vie à celui sous les pieds du quel le paradis n'a pas hésité à prier pour moi tout au long des jours de ma vie pour ma chère mère,

Comme je le dédie à cette grande montagne qui n'a pas hésité à m'aider en rien à mon père le grand homme,

Et aussi à mes chers frères WAEL & HAYTHAM, et à ne pas oublier la copie La miniature pour ma mère, ma chère sœur RANA, et pour de me compagne sur du travaille Abed AL-Nour

Et bien sûr pour mes amis, mes frères, avec qui nous avons passé les plus belles années de notre vie ici (Kimo, Ahmed, Dallol, Alaa, Ibrahim, Qasqas, Raed, Azer, Hossam, Majed ,Afana ,Ismail ,Aref , Nemer) et la longue liste de ceux qui nous ont accompagnés toutes ces années sont été une source de joie Bonheur et desoutien, à tous ceux que j'ai rencontrés ici dans le pays d'Algérie et ils étaient ma deuxième famille, pour les âmes des martyrs de Palestine et pour l'âme de Shireen Abu Akleh.

Tout le respect et le grand amour pour vous et le succès dans votre vie et vous voir bien.

SAMIR ALI

---



# Dédicasse

A qui m'a donné le meilleur de lui même;

Mon père

.A qui m'a donné toujours de l'espoir;

Ma mère

.A mes sœurs et mes frères.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment

CHATRA ABD NOUR

---

# Table des matières

Table des matières.....	I
Liste des figures .....	IV
Liste de tableaux.....	VI
Liste des Notations et Symboles .....	VII
Introduction générale .....	1

## Chapitre 1 : machine asynchrones

I-1 Introduction.....	4
I-2 La machine asynchrone .....	4
I-2-1 Eléments de constitution de la machine asynchrone .....	4
I-2-1-1 Stator.....	5
I-2-1-2 Rotor à cage .....	5
I-2-1-3 Les paliers .....	6
I-2-2 Principe de fonctionnement .....	7
I-3 Les défauts dans la machine asynchrone à cage .....	8
I-3-1 Introduction .....	8
I-3-2 Causes des défauts.....	8
I-3-3 Étude statistique .....	8
I-3-4 Différents défauts dans la machine asynchrone à cage .....	10
I-3-4-1 Défaillances au stator .....	10
I-3-4-1-1 Court-circuit enter phase.....	10
I-3-4-1-2 Court-circuit enter spire .....	10
I-3-4-1-3 Défauts de circuit magnétique.....	11
I-3-4-1-4 Court-circuit phase / bâti .....	11
I-3-4-2 Défauts rotoriques.....	11
I-3-4-2-1 Cassure de la barre .....	12
I-3-4-2-2 Ruptures de d'anneaux .....	12

I-3-4-2-3 Excentricité statique et dynamique .....	13
I-3-4-3 Défaillances mécaniques .....	14
I-3-4-3-1 Défauts roulements .....	14
I-4 Présentation des différentes méthodes de diagnostic .....	15
I-4-1 Définition et objectif du diagnostic.....	15
I-4-2 Les Méthode de diagnostic.....	16
I-4-2-1 Les méthodes de connaissance .....	16
I-4-2-2 Les méthodes de redondances analytiques .....	16
I-4-2-3 Méthodes de traitement des signaux .....	16
I-5 Différentes techniques de diagnostic des machines électrique .....	17
I-5-1 Techniques mécaniques .....	18
I-5-1-1 Diagnostique par mesure des vibrations du moteur .....	18
I-5-1-2 Diagnostique par la mesure de la température .....	19
I-5-2 Diagnostique chimique .....	19
I-5-3 Techniques magnétiques et électriques .....	19
I-5-3-1 Diagnostique par mesure du flux axial de fuite.....	19
I-5-3-2 Diagnostique par mesure des courants... ..	20
I-5-4 Autre technique de diagnostic de grandeur .....	20
I-5-4-1 Diagnostique par mesure de couple électromagnétique .....	20
I-5-4-2 Diagnostique par mesure de la vitesse .....	20
I-6 Conclusion .....	20

## **Chapitre II : La modélisation et simulation de la MAS par méthode des éléments finis**

II-1 Introduction .....	21
II-2 Méthodes de modélisation des machines asynchrone .....	21
II-2-1 Modélisation par les équations magnétiquement couplés (CEMC) .....	21
II-2-2 Méthode des réseaux de perméances (RNM) .....	22
II-2-3 Méthode des éléments Finis.....	23

II-2-3-1 Principe de la méthode des éléments finis .....	23
II-3 Présentation de logiciel Flux 2D .....	24
II-4 Application à la simulation de la machine asynchrone.....	26
II-4-1 Les matériaux conducteurs.....	27
II-4-2 Les matériaux magnétiques .....	27
II-5 Résultats de simulation.....	29
II-5-1 Résultats graphiques .....	29
II-5-2 Analyse des caractéristiques de la machine.....	30
II-6 Modélisation de flux fuit .....	31
II-6-1 Champ de dispersion des machines à courant alternatif .....	31
II-6-2 Simulation de champ de fuite par MEF.....	33
II-7 Conclusion.....	35

## **Chapitre III : diagnostic des défauts de la machine asynchrone**

III-1 Introduction.....	37
III-2-Simulation des Défaut de court-circuit entre spire.....	37
III-3 Transformée de Fourier rapide (FFT) .....	44
III-4 Diagnostic par l'analyse fréquentielles .....	46
III-4-1 Analyse des courants statorique .....	47
III-4-2 Analyse de flux de fuite .....	48
III-2 Conclusion .....	51
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>52</b>

### **Références**

### **Résumé**

# Liste des figures

- FigI.1:** Eléments Constitutif D'une machine asynchrone cage d'écureuil.
- Fig. I.2 :** Photo du stator d'une machine asynchrone.
- FigI.3 :** Vue schématique en perspective du rotor (tôles, magnétiques, conductrices).
- Fig.I.4:** Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage.
- Fig. I.5 :** Proportion Défaut.
- FigI.6:**Répartition des pannes sur les machines asynchrones de faibles ou moyennes puissances.
- Fig. I.7 :**Répartition des pannes sur les machines asynchrones de fortes puissances.
- Fig. I.8:** Représentation des différents défauts statoriques possible.
- FigI.9:** Court-circuit entre spire.
- FigI.10:** Ruptures de barres.
- FigI.11:**Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.
- Fig. I.12:** Les défauts d'excentricité.
- Fig. I.13:**Architecture d'un roule mentrigi de à billes.
- FigI.14:**Les étapes du diagnostic.
- Fig. I.15:** Méthodes de diagnostic de la machine asynchrone
- Fig. I.16 :** Représentation de quelques grandeurs mesurable sur une machine électrique
- Fig. II.1.**Schéma électrique équivalent à la cage rotorique
- Fig. II.2** Réseau de perméances élémentaire autour d'encoche statorique
- FigII.3:**Fonction d'interpolation d'un élément.
- FigII.4:**Démarche générale pour l'implémentation du modèle en Flux.
- FigII.5:**géométrie de la machine étudiée.
- FigII.6:** Répartition du maillage.
- FigII.7:**Caractéristiques B(H) du matériau magnétique fer.
- Fig.II.8:** Circuits représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie
- Fig. II.9:**Répartition des lignes du flux à l'extérieur et l'induction magnétique pour le fonctionnement nominal à  $t=1.5s$ .
- FigII.10:**Densité du courant dans les bars réseau fonctionnement nominale à  $t=1.5s$
- FigII.11:**Courant de phase en fonction du temps.
- FigII.12:**couple en fonction de temps.
- FigII.13 :**la vitesse en fonction de temps.

**FigII.14 :** Répartition de lignes de flux de fuite dans une machine électrique.

**FigII.15:**la Parties du champ extérieur.

**FigII.16:** Mesure de champ de dispersion

**Fig. II.17.** Model de la machine avec un capteur externe.

**FigII.18:** lignes du flux à l'extérieur.

**FigII.19:** flux de fuit en fonction de temps.

**Fig.III.1:** Analyse MEF pour le calcul du champ magnétique (a) géométrie du MAS (b) modèle decircuit électrique

**Fig.III.2:** la Répartition des : lignes du flux à l'extérieur à  $t=1.5s$ :(a) machine saine,(b)court-circuit 40 spires,(c)court-circuit 80 spires.

**Fig.III.3:** Répartition de l'induction dans le circuit magnétique : (a) machine saine , (b) court-circuit 40spires , (c) court-circuit 80spire

**Fig. III.4:** la Répartition de densité de courant à  $t=1.5s$ :(a) machine saine,(b)court-circuit 40 spires,(c)court-circuit 80spires.

**Fig. III.5** le courant de la phase avec défauts

**.Fig. III.6:** la couple avec défauts .

**Fig.III.7:** la vitesse avec défauts.

**FigIII.8 :** flux de fuit avec defaults.

**Figure III.9. :** Lignes de champ magnétique à l'extérieur de la machine avec défaut de court-circuit : (a) court-circuit 40 spires, (b) court-circuit 80 spires.

**Figure III.10.** Représentation temporelle et fréquentielle somme de deux sinusoïdes.

**Figure III.11.** Perte de localisation temporelle.

**Fig. III.12:** le spectre de courant statorique de 0 Hz à 500 Hz et 0 Hz à 200 Hz pour une machine avec défaut court-circuit.

**Fig. III.13:** le spectre de flux de fuit de 0 Hz à 500 Hz et 0 Hz à 200 Hz pour une machine avec défaut court-circuit

# Liste de tableaux

Tableau. II .1:Caracteristique de la machine étudiée.

Tableau. II. 2: B(H) Du matériau magnétique fer.

# Liste des Notations et Symboles

**MAS** : Machine asynchrone.

**CEMC** : la Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.

**RNM** : la méthode des réseaux de permanées.

**MEF** : Méthode des éléments Finis.

**F.m.m** : forces magnétomotrices

**FFT** : Fast Fourier Transforme.

$\omega_s$  : Vitesse électrique statorique.

$\Omega_s$  : vitesse de synchronisme.

$f_s$  : fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation.

**P** : le nombre de paires de pôles.

$\Omega$  : la vitesse de rotation du rotor.

**g** : Le glissement.

**e** : Numéro d'élément.

**Ne** : Le nombre totale des éléments du domaine.

**B** : densité de flux magnétique.

**H** : intensité du champ magnétique.

$\mu_o$  : la perméabilité magnétique de l'air.

## Introduction générale

En raison de sa robustesse et de sa polyvalence, le moteur à cage d'écureuil asynchrone est souvent appelé le "workhorse." Toutefois, il présente des limites qui entraînent des défauts prématurés du stator ou du rotor. Les industriels sont de plus en plus préoccupés par la sécurité des outils de production. Cette demande de sécurité est motivée par les exigences de production et se situe actuellement au niveau des spécifications imposées par les fabricants à leurs fournisseurs. Ce n'est plus seulement le produit qui est vendu, mais l'assurance d'un taux de disponibilité garanti. Ces contraintes du marché nécessitent un changement de politique de maintenance. Celui-ci était principalement correctif dans les applications standard et préventif dans les applications critiques [1].

La surveillance d'un dispositif implique la découverte et le diagnostic de problèmes en détectant un changement anormal dans le comportement ou l'état d'un système. L'objectif est d'assurer la sécurité et la continuité du service, ainsi que de consigner les événements qui peuvent être utilisés pour la maintenance curative ou le retour d'expérience. [4] Le travail du système de diagnostic est de détecter les symptômes, d'analyser les données et d'interpréter les résultats. Les études dans ce domaine ont considérablement progressé afin d'éviter les dysfonctionnements récurrents des machines. En conséquence, aucun système de contrôle n'est imperméable à la défaillance. Par conséquent, il est essentiel de détecter les divers défauts qui peuvent se produire dans ces systèmes en utilisant des moyens traditionnels ou modernes qui nous permettent de surveiller et de contrôler le système en mettant en œuvre des mesures préventives pour détecter ces incidents inattendus sur la machine. Les perturbations électriques sont de plus en plus courantes en raison d'un nombre croissant de défauts de la machine (par exemple, cassure des barres, court-circuit entre spires, défauts de roulement, coupure de phase, etc.). Les progrès technologiques récents dans le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones sont largement utilisés dans les systèmes de contrôle avec détection et diagnostic des défauts. [2] [3] [31].

Ce mémoire est rédigé de ce point de vue. Il s'intéresse à la surveillance et au diagnostic des défauts du moteur asynchrone en l'occurrence les défauts statorique et rotorique. Il est basé sur la connaissance des machines électriques et de traitement des signaux.

Notre premier objectif en abordant ce mémoire était de comprendre et d'analyser les défauts qui pourraient se produire dans la machine asynchrone. Notre deuxième objectif, qui a été abordé en détail dans le dernier chapitre, était la recherche et le développement d'outils de surveillance et de diagnostic des défauts.

Pour ce faire trois chapitres sont agencés de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous allons passer en revue les composants de base d'une machine asynchrone ainsi que les différents défauts qui peuvent se produire avec ce type de machine. Ensuite, nous allons donner un aperçu des méthodes de diagnostic actuelles pour les machines asynchrones.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du modèle de simulation par la méthode des éléments finis, sous le logiciel 2D Flux, pour analyser le comportement de la machine en l'absence et en présence de défaillances.

Nous avons suggéré au troisième chapitre une stratégie de détection des défauts de court-circuit entre spire dans les machines asynchrones, basée sur l'analyse spectrale du champ magnétique de fuit.



# **Chapitre 1 : machine asynchrone**

### I-1 Introduction

Dans ce premier chapitre, nous présenterons les principaux composants de la machine à induction. Ensuite, nous discuterons des différents types de défauts (électriques et mécaniques) qui peuvent se produire dans la machine. Ensuite, nous verrons comment diagnostiquer les défauts dans une machine à induction pour détecter et localiser les défauts. Les méthodes de diagnostic les plus couramment utilisées sont ensuite décrites.

### I-2 La machine asynchrone

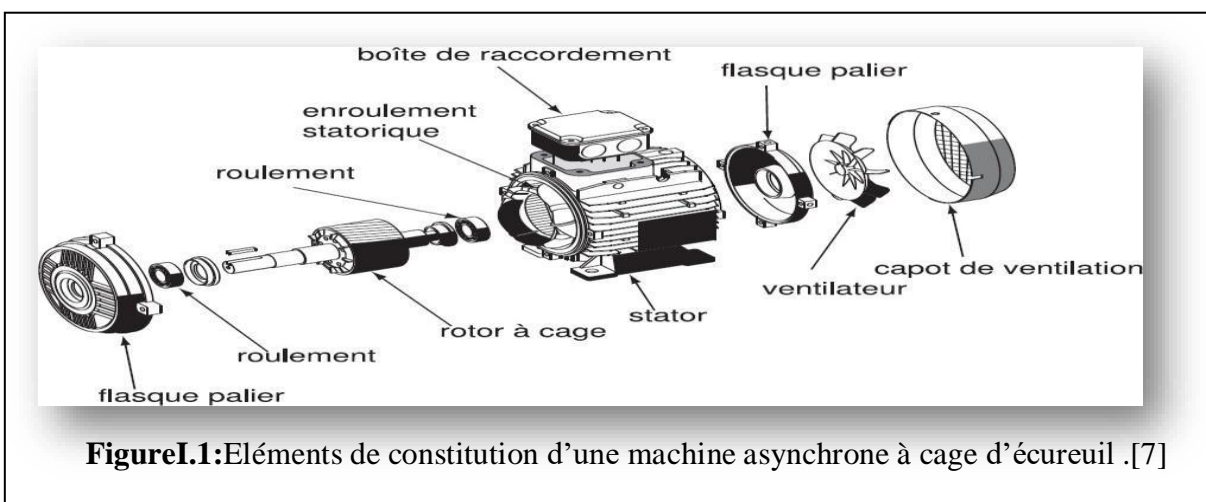
Le moteur asynchrone, également connu sous le nom de moteur à induction, est le type le plus courant de moteur électrique en usage aujourd'hui. Son principal avantage est l'absence de contacts électriques glissants, ce qui se traduit par une structure simple et robuste qui est facile à construire. La puissance disponible varie de quelques watts à plusieurs mégawatts. Il est connecté directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes et tourne à une vitesse variable légèrement différente de la vitesse synchrone; il est utilisé pour réaliser presque tous les entraînements à vitesse constante. Le moteur asynchrone permet également la réalisation d'entraînements à vitesse variable, et son importance dans ce domaine est en croissance. Plus de 60% de l'énergie électrique consommée dans les pays industrialisés est convertie en énergie mécanique par des moteurs électriques [4].

Malgré sa robustesse, la machine asynchrone, comme tout autre équipement électrique, est sujette à des pannes électriques et mécaniques. En raison des répercussions considérables et coûteuses que la présence d'un défaut peut avoir sur les opérations industrielles, le diagnostic des défauts a reçu beaucoup d'attention au cours des deux dernières décennies [5].

#### I-2-1 Eléments de constitution de la machine asynchrone

La machine à induction est composée d'un stator et d'un rotor en tôles d'acier au silicium avec des encoches dans lesquelles les enroulements sont placés. Le stator est fixe, et les enroulements qui se connectent à la source sont présents. Le rotor est monté sur un axe de rotation sur lequel sont placés les enroulements qui seront accès de l'extérieur [6].

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



**Figure I.1:** Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil .[7]

### I-2-1-1 Stator

Le stator de la machine asynchrone est composé de tôles d'acier qui abritent les bobines de stator. Ces plaques sont découpées en une seule pièce pour les petites machines, tandis qu'elles sont découpées en sections pour les machines plus grandes. Ils sont habituellement recouverts de vernis pour réduire l'effet des courants de Foucault. Enfin, ils sont boulonnés ou soudés ensemble pour former le circuit magnétique du stator. Une fois cette étape de montage terminée, les enroulements du stator sont insérés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être imbriqués, ondulés ou concentriques dans la nature. Lorsqu'une machine asynchrone est enroulée mécaniquement, un enroulement concentré est fréquemment utilisé. Les enroulements sont formés de plaques de cuivre de différentes sections mises directement dans les encoches pour les machines énormes. Des matériaux isolants sont utilisés pour créer une barrière entre les enroulements électriques et les tôles d'acier, qui peut varier en fonction de la façon dont la machine asynchrone est utilisée. Le stator d'une machine asynchrone dispose également d'une boîte à bornes auquel est reliée l'alimentation électrique.



Figure I.2 : Photo du stator d'une machine asynchrone.

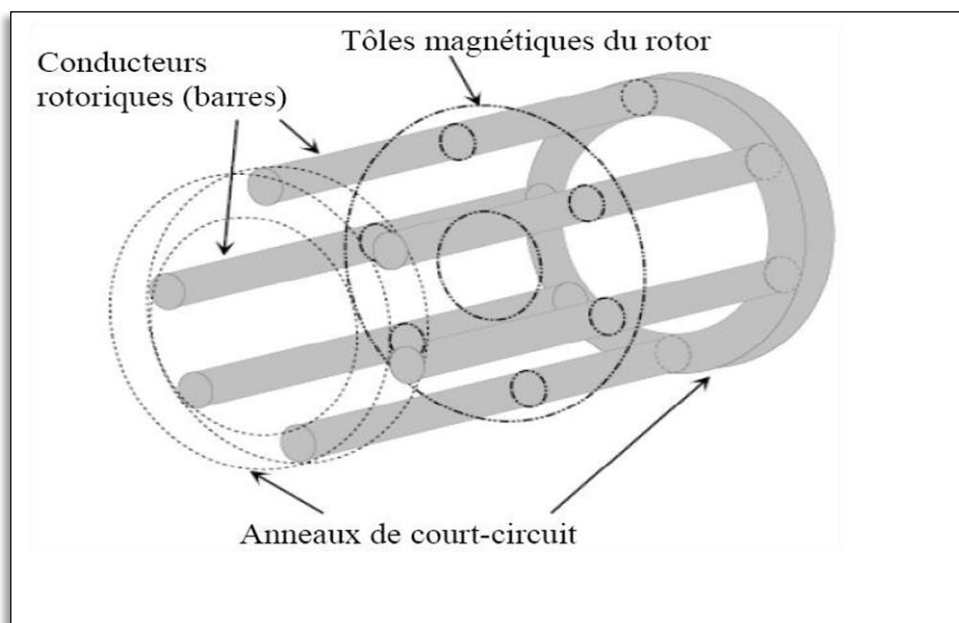
Le choix du type d'encoches pour une machine dépend de la tension de service de la puissance et du type de bobinage, [8].

### I-2-1-2 Rotor à cage

Les anneaux de court-circuit dans le rotor de la cage permettent aux courants de circuler d'un conducteur d'encoche (barre du rotor) à un autre. Ces barres conductrices sont espacées uniformément et forment le circuit du rotor de la figure (I.3). Cette cage est insérée à

L'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine, similaires à celles du moteur rotor bobiné

Les conducteurs dans les rotors de cage d'écureuil sont fabriqués en moulant un alliage d'aluminium ou par des barres de cuivre massives qui sont préformées et frettées dans les tôles de rotor. Il n'y a pas ou très peu d'isolation entre les barres rétorques et les tôles magnétiques en général, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'une rupture de barre. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus facile à construire que le moteur à rotor à bobine, il est donc moins cher. De plus, il est plus robuste. Il représente la part du lion de la flotte de moteurs asynchrones actuellement en service.



**Fig.I.3.** Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices)

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).[9]

### I-2-1-3 Les paliers

Les paliers qui soutiennent et font tourner l'arbre du rotor sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte sont fixées au carter du stator à l'aide de boulons ou de tiges de serrage, comme le montre la figure I.1. La cage d'écureuil asynchrone est alors formée par l'ensemble qui a été établi.

**I-2-2 Principe de fonctionnement**

L'interaction électromagnétique du champ tournant, créée par le courant triphasé fourni par un réseau de pulsation triphasé équilibré de pulsation  $\omega_s$  aux enroulements statoriques, et les courants induits dans l'enroulement du rotor lorsque les conducteurs d'enroulement du rotor sont coupés par le champ magnétique tournant, soutient le fonctionnement du moteur asynchrone (loi LENZ). Cette interaction électromagnétique entre les deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor.

Dans la MAS, l'onde du champ tournant se déplace dans l'entrefer de la machine avec une vitesse de rotation nommée vitesse de synchronisme  $\Omega_s$ . Elle est liée à la fréquence d'alimentation  $f_s$  par l'expression suivante :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = 60 * \frac{f_s}{p} \quad (\text{tr/min}) \tag{I.1}$$

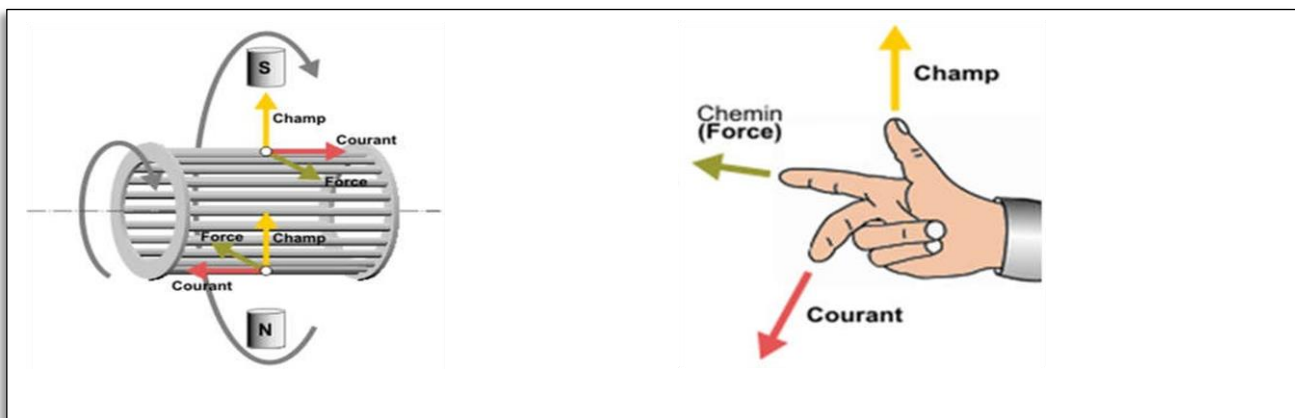
Ou  $f_s$ : fréquence des tensions triphasées du rseau d'alimentation[HZ].

P: le nombre de paires de pôles.

Lorsqu'un rotor en court-circuit est balayé par ce champ tournant, des courants induits (courants de Foucault) le traversent, le soumettant à des forces électromagnétiques de Laplace. Toutes ces forces se combinent pour produire un couple moteur qui fait tourner le rotor (voir la figure I.4). Le rotor tourne dans la même direction que le champ tournant, mais à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ tournant ( $\Omega < \Omega_s$ ) [10]

Il y a toujours une différence de vitesse entre le stator et le rotor. Cette différence est connue sous le nom de glissement (g), et c'est une caractéristique unique du MAS. Il est défini comme la différence de vitesse entre la vitesse de synchronisation ( $\Omega_s$ ) et la vitesse de rotation du rotor ( $\Omega$ ). Après cela, Le glissement (g) est donné par:

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \tag{I.2}$$



**Fig.I.4.** Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage[10]

### I-3 Les défauts dans la machine asynchrone à cage

#### I-3-1 Introduction

La sécurité des systèmes est essentielle dans les processus industriels; toute défaillance de l'instrumentation conduit à la production de fausses informations; la machine asynchrone est bien adaptée à l'environnement industriel en raison de sa robustesse; toutefois, la cage d'écureuil asynchrone peut présenter des défauts structuraux, y compris une défaillance totale ou partielle de la barre de rotor et de portion d'anneau. Dans cette section, nous aborderons les différents défauts de la machine asynchrone. [11]

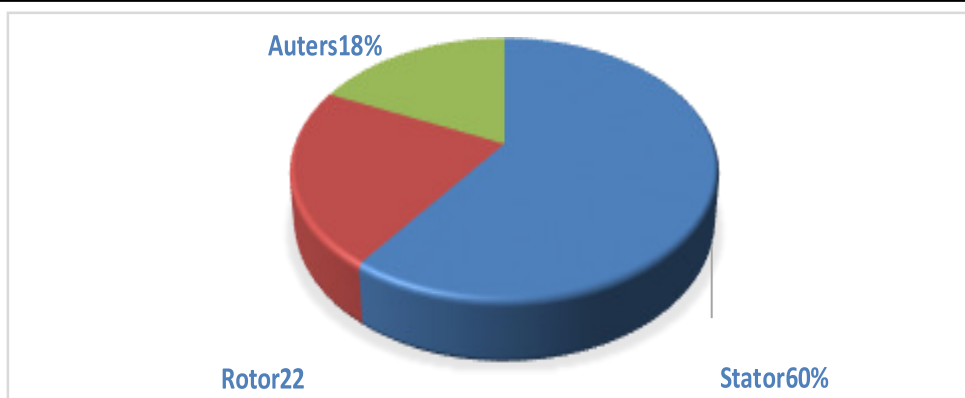
#### I-3-2 Causes des défauts

Les origines des défauts sont souvent de nature différente, mais sont généralement fortement liées les uns aux autres, on cite comme causes majeures [12] :

- a) Causes thermiques : balourds thermique, points chauds, températures ambiantes élevées.
- b) Entourage du moteur (tension transitoire d'alimentation, inverseurs, air de refroidissement, mauvais courant de charge, sur charge, corrosion humidité...)
- c) Causes mécaniques et mauvais emploi du moteur (résonance avec la commande de la vitesse, chocs en service, vibrations, jeu excessifs, balourds mécaniques...)
- d) Les vices de fabrication.
- e) Erreurs pendant la réparation (taille et type impropriété d'enroulement, roulement inadéquat).
- f) Equissement de la durée de vie du moteur.[11]

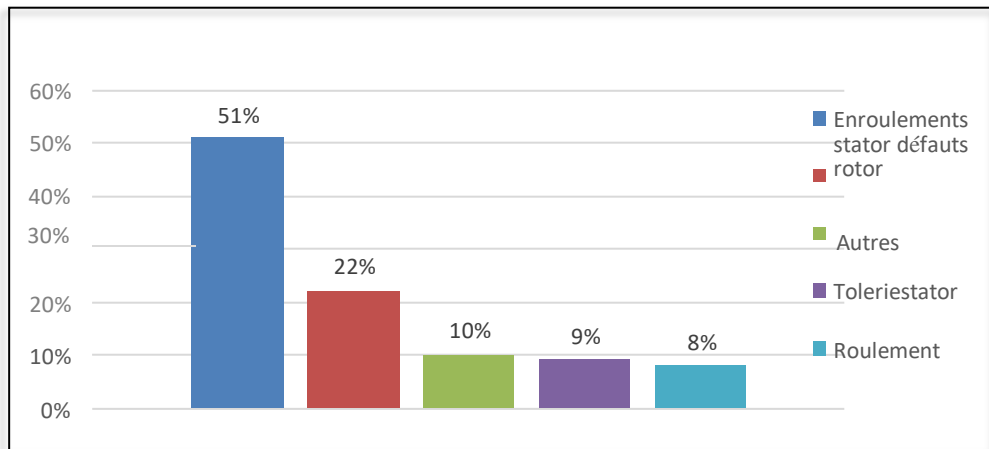
#### I-3-3 Étude statistique

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants (figureI.5)[13] :



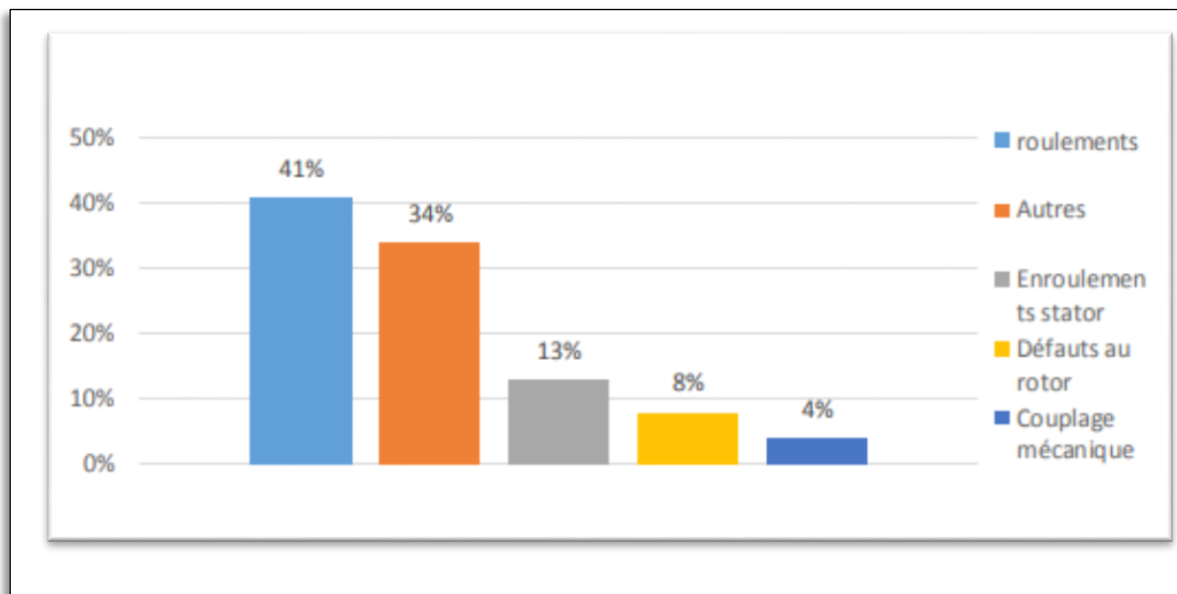
/Fig.I.5 .Proportion du défaut[13]

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure(I.6)[14]:.



**FigureI.6%:**Répartition des pannes sur les machines asynchrones de faibles ou moyennes puissances [14].

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur la figure(I.7)[14].



**FigureI.7:**Répartition des pannes sur les machines asynchrones de fortes puissances[14].

### I-3-4 Différents défauts dans la machine asynchrone à cage :

#### I-3-4-1 Défaillances au stator

Même si la vibration des conducteurs d'entaille et le frottement résultant des exigences élevées de la machine accélèrent l'usure des isolateurs, le principal facteur de vieillissement reste le chauffage anormal des bobinages. La poussière et l'humidité sont déposées sur les machines fermées entre les ailettes extérieures et les machines ouvertes au niveau des têtes de bobine qui fonctionnent dans des environnements hostiles, affaiblissant l'isolation électrique et court-circuitant les conducteurs. [15]

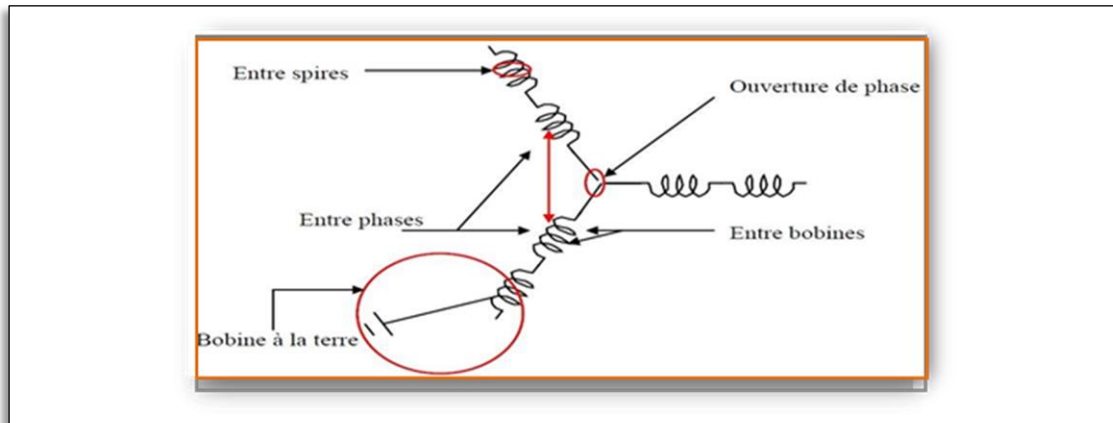


Figure I.8. Représentation des différents défauts statoriques possible [15]

#### I-3-4-1-1 Court-circuit entre phase

Ce défaut peut se produire à n'importe quel point du bobinage, mais il est plus fréquent dans les têtes de bobine, où les conducteurs de différentes phases se rencontrent. L'impact de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine est déterminé par l'emplacement du défaut (de la partie affectée) [16]. L'apparition d'un court-circuit près de l'alimentation inter-phase induirait des courants très élevés, provoquant la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou le débranchement des protections. Un court-circuit proche du neutre entre deux phases, par contre, provoque un déséquilibre sans provoquer de fusion de conducteurs [17]. Dans le cas des machines asynchrones, l'apparition de ce type de défaut provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que les anneaux du rotor de la cage [16].

#### I-3-4-1-2 Court-circuit entre spire

Un défaut commun est un court-circuit entre spires de la même phase. Cette défaillance peut être attribuée à un ou plusieurs défauts d'isolation dans l'enroulement concerné. Il augmente les courants du stator dans la phase affectée, provoque une légère variation d'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotor. Cela augmente la température du bobinage et, par conséquent, accélère la dégradation de l'isolant, ce qui peut conduire à un défaut de chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit).

Par contre, le couple électromagnétique moyen fourni par la machine demeure sensiblement le même, à l'exception d'une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut[18].



**Fig.I.9.**Court-circuit entre spire[18]

### **I-3-4-1-3 Défauts de circuit magnétique**

Les tôles de circuits magnétiques sont laminées et isolées, mais elles sont susceptibles de court-circuiter. Les causes les plus courantes de défauts de circuit magnétique sont un grave défaut d'excentricité statique et/ou dynamique, qui peut provoquer un contact frontal entre le stator et le rotor, détruisant le circuit magnétique, ou un court-circuit des conducteurs, qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles, de sorte que la projection de matière étrangère dans l'entrefer peut conduire à l'abrasion des tôles et donc court-circuiter [16].

### **I-3-4-1-4 Court-circuit phase / bâti**

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons mécaniques, il est souvent connecté à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a aucun effet matériel, sauf pour effets capacitifs, parce que le bâti prend le potentiel de l'enroulement au circuit, ce qui peut causer des défauts d'isolation dans l'enroulement. De plus, cette défaillance entraînera la production d'un composant. D'autre part, en termes de sécurité personnelle, ce type de défaut peut être extrêmement dangereux, nécessitant l'installation de dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). Lorsque ce type de défaillance se produit, la tension de la phase affectée reste inchangée. Cependant, à mesure que la résistance et l'inductance sont réduites, le courant dans cette phase augmente. Cette augmentation du courant provoque une augmentation de la température homopolaire, qui se traduit par l'apparition d'un couple pulsant. Ce type de défaut a pu être détecté à l'aide d'une mesure de courant de fuite [19].

### **I-3-4-2 Défauts rotoriques**

Une analyse du régime permanent du spectre du courant statorique fournit des indications des défauts du rotor tels que la rupture de la barre, d'anneaux de court-circuit ou l'excentricité de l'entrefer [8] [20].

### I-3-4-2-1 Cassure de la barre

Une cassure ou rupture de barre est l'un des défauts de rotor les plus courants. Il peut être trouvé à son encoche ou à l'extrémité qui le relie à l'anneau du rotor. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, entraînant des vibrations mécaniques qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation et, par conséquent, un fonctionnement anormal de la machine. La détérioration de la machine est accélérée par la grande amplitude de ces oscillations.

Par conséquent, le couple de serrage diminue rapidement à mesure que le nombre de barres cassées, ce qui provoque la défaillance. L'effet d'une cassure de barre augmente de façon exponentielle en proportion du nombre de barres cassées[18].



**Fig.I.10.**Ruptures de barres[21].

### I-3-4-2-2 Ruptures de d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui survient aussi souvent que la cassure de barre. Ces ruptures sont causées soit par des bulles dans la coulée, soit par des dilatations différentielles entre les barres et les anneaux [22], car les portions d'anneaux de court-circuit déménagent plus de courant que des barres rotoriques [16]. En conséquence, un dimensionnement mal des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité, etc.) ou une surcharge du couple et des courants peuvent les faire se rompre [17]. La rupture d'une portion d'anneau perturbe la distribution des courants dans les barres rotoriques, provoquant un effet de modulation d'amplitude sur les courants du stator similaire à celui causé par la cassure de barres [22].

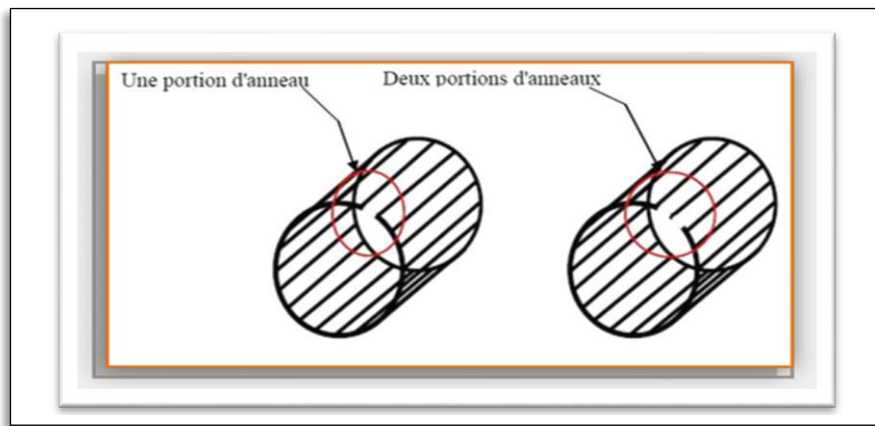


Figure I.11. Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit [22].

### I-3-4-2-3 Excentricité statique et dynamique

La densité de flux entrefer varie selon la longueur de l'entrefer. Les enroulements statoriques sont électriquement affectés. Ces effets sont alors visibles dans le spectre des courants. En général, il y a trois types d'excentricité. [23]:

- 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 mixte, associant les deux cas précédemment cités

On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante

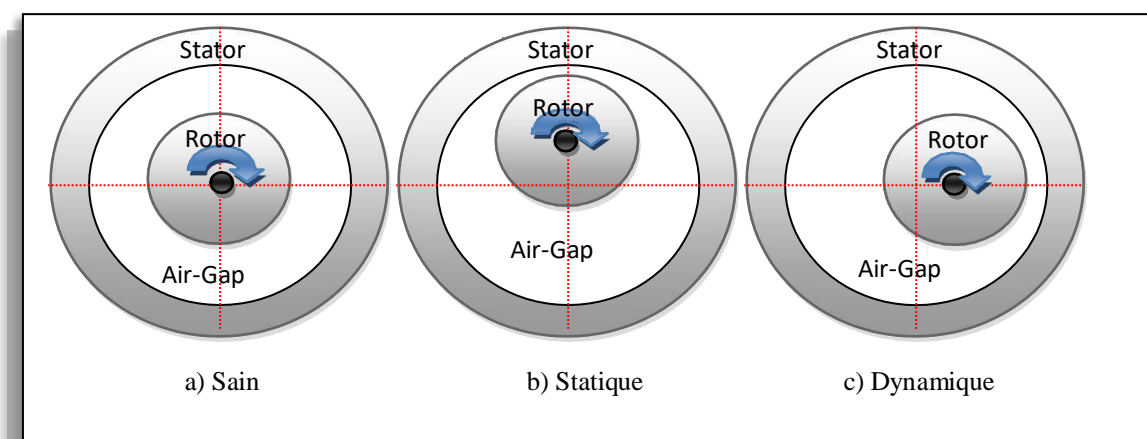


Figure I.12: Les défauts d'excentricité [24][25]

### I-3-4-3 Défaillances mécaniques

Les défaillances mécaniques sont le type le plus commun de défaut de machine asynchrone. Ces défauts peuvent se produire dans les roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur. Nous énumérons certaines de cela suite du document et nous pouvons trouver dans la littérature des ouvrages très complets qui traitent de ces divers problèmes. [26] [27]

#### I-3-4-3-1 Défauts roulements

Le roulement est un composant de base qui fournit un lien mobile entre deux parties d'un mécanisme par rapport à l'autre. Sa fonction est de permettre la rotation relative de ces éléments sous charge, avec précision et un frottement minimal.

La majorité des machines électriques utilisent des roulements à billes ou à rouleaux. Les roulements sont responsables d'environ 40% à 50% des défauts rencontrés dans les machines asynchrones.

Le roulement est composé des pièces suivantes :

- Deux bagues concentriques en acier, appelés bague intérieurs et extérieurs, avec chemins de roulement (surfaces sur lesquelles "roulent" les corps roulants).

- Corps de roulants, billes ou rouleaux en acier qui permettent aux deux bagues de se déplacer avec un minimum de frottement.

- Cage qui sépare et guide les corps de roulants (polyamide, tôle d'acier, laiton ou résine). Les roulements sont classés en deux types : les roulements à billes, dans lesquels le contact à billes est théoriquement ponctuel, et les roulements à rouleaux, dans lesquels le contact rouleau-chemin est théoriquement linéaire. Le roulement à billes est le plus utilisé dans l'industrie parce qu'il a le meilleur rapport performance prix. La figure (1.13) montre la construction typique d'un roulement à billes. Les billes sont liées par une cage qui assure une distance uniforme entre elles et empêche tout contact.

Dans des conditions normales de fonctionnement, des défauts de roulement peuvent se produire en raison de la fatigue du matériau. Des fissures apparaissent sur les pistes et sur les billes au début. Ensuite, l'écaillage et des arrachements de matériaux peuvent accélérer rapidement l'usure des roulements. Ces événements s'accompagneront d'une augmentation du bruit et des vibrations [28].

Les types de défauts suivants peuvent être distingués en fonction de l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement :

- Défaut de bague extérieure.
- Défaut de bague intérieure.
- Défaut de billes.
- Défaut de cage.

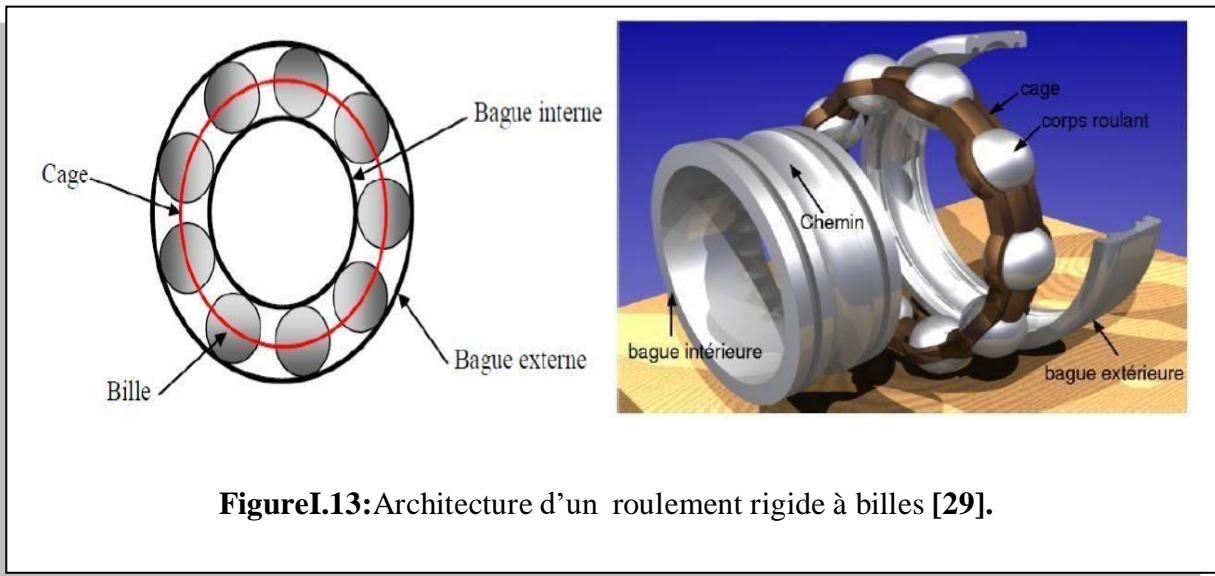


Figure I.13: Architecture d'un roulement rigide à billes [29].

## I-4 Présentation des différentes méthodes de diagnostic

### I-4-1 Définition et objectif du diagnostic

La détection, la localisation et l'identification des défauts sont les trois principales étapes du diagnostic des défauts. La détection est le processus qui consiste à signaler l'existence d'un défaut, tandis que la localisation de l'objet principal détermine le type de défaut ou l'emplacement de l'occurrence du défaut, et l'identification détermine le degré de gravité d'un défaut dans un système. La partie la plus avancée de la détection et de la localisation d'un composant ou élément défectueux dans un système électrique est le diagnostic [30].

L'objectif d'un système de diagnostic est de prévoir l'apparition d'un défaut le plus rapidement et le plus précisément possible (détection), afin que le défaut puisse être localisé, identifié et que le type maintenance approprié puisse être appliqué. En effet, afin d'expliquer plus précisément ce principe, nous rappellerons des fonctions de diagnostic telles que la détection, la localisation et l'identification des défauts [31].

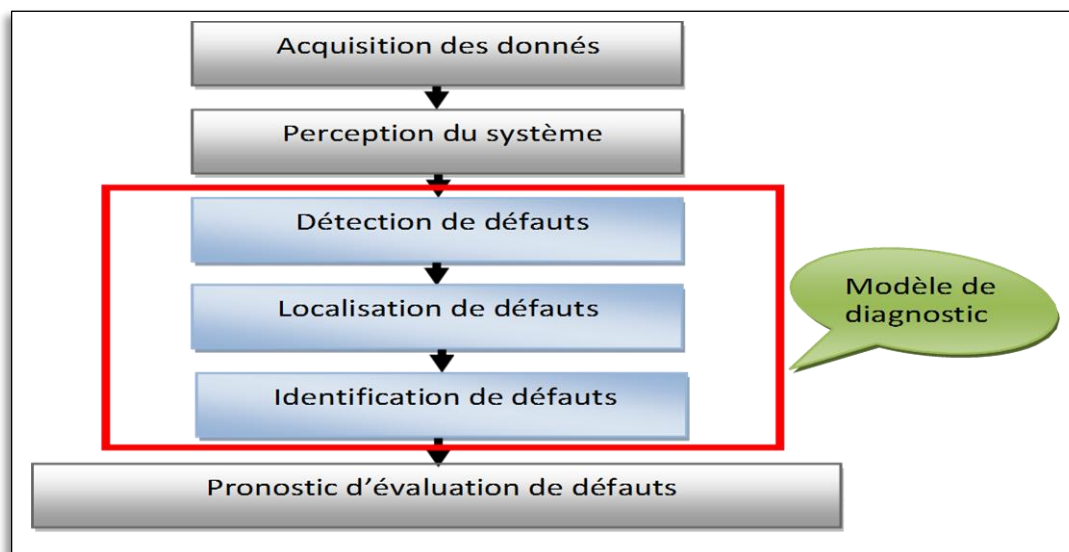


Figure I.14 : Les étapes du diagnostic [31]

### I-4-2 Les Méthode de diagnostic

Les trois axes qui composent le domaine du diagnostic des machines électriques [32] sont identifiés dans divers travaux, conduisant à la définition de trois méthodologies de diagnostic : les méthodes de connaissance, les méthodes de redondance analytique et les méthodes de modélisation des signaux (voir la figure I.15).

La figure I.15 présente les procédures de diagnostic des machines électriques.

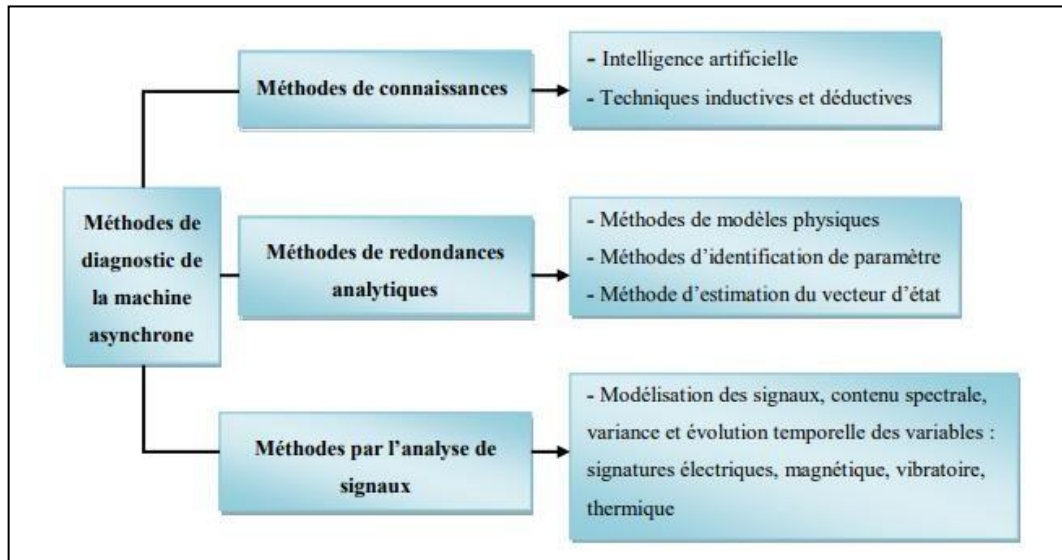


Figure I.15: Méthodes de diagnostic de la machine asynchrone [16]

#### I-4-2-1 Les méthodes de connaissance

Ne pas décrire les relations de cause à effet à l'aide d'un modèle mathématique. La connaissance est basée uniquement sur l'expérience humaine, qui est complétée par la rétroaction. La littérature [33-34] présente plusieurs techniques de détection des défauts à l'aide de ces méthodes. Les techniques d'intelligence artificielle mettent en œuvre la reconnaissance des formes, les systèmes experts, les réseaux neuronaux [35] et la logique floue [36-37], qui peuvent être utilisés indépendamment ou en combinaison pour améliorer l'efficacité. Les méthodes inductives ou déductives ne s'appliquent pas directement au diagnostic, mais elles peuvent être utiles. Ils sont principalement utilisés pour définir les causes de défaillance par l'utilisation de modèles de pannes. Il convient de noter que ces méthodes sont davantage du ressort des automaticiens que des électrotechniciens.

#### I-4-2-2 Les méthodes de redondances analytiques

Sont fondés sur la modélisation quantitative du système et utilisent les relations entre les variables du système pour déterminer les paramètres physiques à surveiller. Les méthodes de modèles physiques, les méthodes d'identification des paramètres et les méthodes d'estimation des vecteurs d'état sont les trois types.

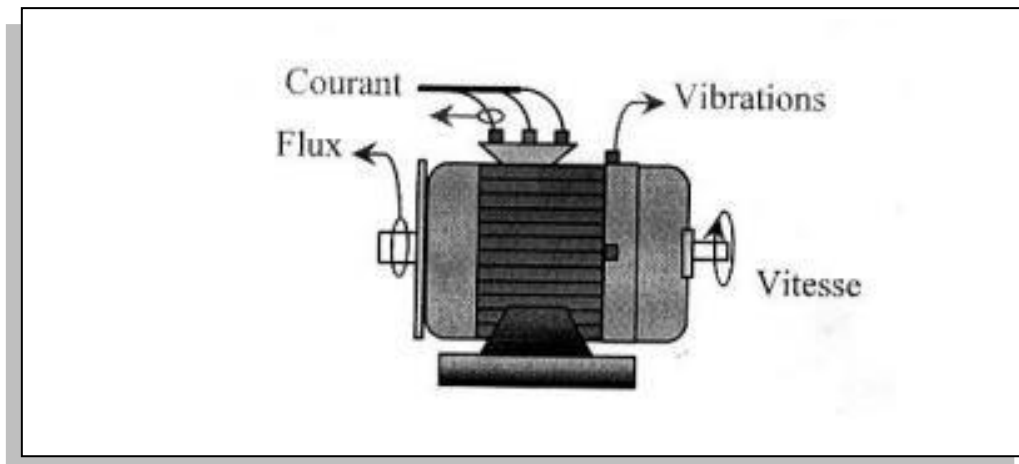
#### I-4-2-3 Méthodes de traitement des signaux

L'existence de caractéristiques de fréquence spécifiques au fonctionnement sain ou défaillant du procédé est le principe sous-jacent des méthodes d'analyse des signaux. Depuis de

Nombreuses années, le traitement des signaux est utilisé pour détecter les pannes dans les machines électriques, principalement les pannes de rotor [38]. Bien sûr, la modélisation des signaux est la première étape de cette approche. Ils seront ensuite caractérisés dans le domaine des fréquences, avec leur contenu spectral, leur variance, etc. [38], [39]. L'analyse de ces quantités quantitatives attribuées avec précision aux signaux de défaut reste la méthode la plus couramment utilisée pour diagnostiquer les défauts dans les machines électriques. De nombreux phénomènes, comme le bruit, l'échauffement, les vibrations, etc., sont causés par l'apparition d'un défaut. Ces symptômes sont le résultat évident d'un changement dans les caractéristiques électriques et mécaniques de la machine. Des recherches antérieures confirment l'existence de plusieurs techniques de détection des défauts par traitement de leurs signaux [40-41]. Ces méthodes sont bien adaptées à la détection des défauts parce que le défaut est reflété par l'apparition de fréquences qui sont directement liées à la vitesse de rotation. L'analyse spectrale, qui ne nécessite qu'un capteur de courant ou/et un capteur de vitesse, est de loin la méthode de diagnostic la plus rentable et la plus rapide, ce qui explique sa popularité parmi les industriels. La méthode la plus courante pour détecter les défaillances dans les machines électriques est l'analyse spectrale, qui est utilisée pour détecter les ruptures de barres au rotor dans les machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans les bobinages. De nombreux phénomènes entraînent l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou de multiples de la fréquence d'alimentation, ce qui se prête bien à cette approche. Pratiquement, la surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste donc à effectuer une transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont soit électriques, comme la puissance instantanée [42], et plus particulièrement le courant statorique [43-44], soit mécaniques (vibration, couple, électromagnétique) [45], [46], [47], ou bien magnétique (induction magnétique) [48-49].

### **I-5 Différentes techniques de diagnostic des machines électriques**

Les moteurs asynchrones sont soumis à une variété de contraintes pendant le fonctionnement, et l'accumulation de ces contraintes génère des défauts dans divers composants du moteur (fig. I.16). Certaines techniques de diagnostic et de détection sont fondées sur l'observation et la mesure (mesure du champ magnétique, mesure de bruit, mesure de la vibration ... etc.), tandis que d'autres sont fondées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromagnétiques (courant statorique, couple et vitesse de rotation). À ceux d'un moteur sain.



**Fig. I- 16 :** Représentation de quelques grandeurs mesurable sur une machine électrique

Ces techniques peuvent être classées en trois catégories [50]:

- Les techniques mécaniques .
- Les techniques chimiques .
- Les techniques magnétiques et électriques .

### **I-5-1 Techniques mécaniques**

#### **I-5-1-1 Diagnostique par mesure des vibrations du moteur**

Le bruit et les vibrations sont produits par toutes les machines électriques, et leur analyse peut être utilisé pour déterminer l'état de la machine. Les forces magnétiques, mécaniques et aérodynamiques sont les principales causes de bruit et de vibrations. Ces forces sont créés par le champ d'entrefer, dont leur expression est la suivante [51] [52] :

$$\sigma = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (I.3)$$

Avec :

B : l'induction magnétique.

$\mu_0$  : la perméabilité magnétique de l'air.

Les accéléromètres piézoélectriques, qui sont les capteurs les plus utilisés pour surveiller ces vibrations en raison de leur fiabilité, de leur gamme de fréquence élevée et de leur robustesse, peuvent enregistrer des vibrations dans les équipements électriques. Suite à la capture des vibrations, une analyse spectrale est effectuée et comparée à celle d'un moteur sain. La présence d'un défaut dans le moteur est indiquée si le spectre des signaux reçus s'écarte de celui du moteur sain.

### **I-5-1-2 Diagnostic par la mesure de la température**

En raison des pertes mécaniques dans les paliers (frottement et ventilation), les pertes électriques dans les conducteurs, et les pertes magnétiques dans le fer, la machine électrique gaspille une certaine quantité de chaleur. Il en résulte des échauffements générateurs de contraintes thermiques et une diminution du rendement .[50] [53]

L'approche thermique, également connue sous le nom de méthode de diagnostic de température, consiste à surveiller la température de chaque phase de l'enroulement du stator et à la comparer à la valeur limite ; si elle dépasse le taux admissible, le moteur est considéré comme défectueux.

### **I-5-2 Diagnostic chimique**

La majorité des moteurs sont refroidis à l'air, ou plus communément par un circuit fermé avec un échangeur de chaleur refroidi à l'eau. À mesure que l'isolation électrique du moteur se détériore, du monoxyde de carbone est libéré dans le circuit d'air de refroidissement, qui peut être détecté par absorption infrarouge. Dans certaines circonstances, l'huile de roulement est testée régulièrement, et si des produits de dégradation sont détectés, des mesures doivent être prises. [54].

### **I-5-3 Techniques magnétiques et électriques**

#### **I-5-3-1 Diagnostic par mesure du flux axial de fuite**

L'entrefer est l'endroit où la conversion d'énergie électromécanique a lieu. Tout champ magnétique, électrique ou électromagnétique au niveau du rotor ou du stator peut être affectée cette conversion.

Le flux d'entrefer, le flux englouti par les enroulements du stator, et le flux de fuite dans l'axe du rotor sont tous des facteurs qui doivent être étudiés en raison de leur susceptibilité à tout déséquilibre de la machine. [54].

Le flux axial peut être utilisé pour la détection des différents défauts qui surgissent dans les moteurs asynchrones tels que [50] :

- Les ruptures des barres rotoriques et des couronnes de court-circuit.
- Les courts-circuits entre les spires statoriques.
- Les coupures de phases

Une bobine enroulée autour de l'arbre de la machine ou un simple arrangement symétrique des bobines positionnées à l'extrémité de la machine peut détecter le flux de fuite axiale.

Les tensions induites dans les bobines sont enregistrées et examinées, puis comparées aux tensions du moteur sain. La condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite axial comme une technique de diagnostic des défauts est que ce dernier doit avoir une valeur importante. [55]

### I-5-3-2 Diagnostic par mesure des courants

Les méthodes basées sur l'examen du courant du stator sont appelées "Analyse des Signatures des Courants du Moteur (ASCM)," qui a l'abréviation anglaise (MCSA), qui signifie "Motores Current Signature Analysis." Cette méthode détecte les défauts en étudiant des composants de fréquence spécifiques ou en examinant la variation de certains composants existants. Cette méthode est populaire parce qu'elle est simple, peu coûteuse, et la partie expérimentale est simple à réaliser. Il est largement utilisé pour détecter les défauts statoriques, en particulier les défauts de court-circuit entre spires d'enroulement statoriques [3].

### I-5-4 Autre technique de diagnostic de grandeur

#### I-5-4-1 Diagnostic par mesure de couple électromagnétique

Permet la découverte de défauts tout au long du processus de mise en service ou fonctionnement. Les barres de rotor cassées et les courts-circuits du stator peuvent être détectés à l'aide de cette méthode. Les déséquilibres induits par des barres de rotor cassées ou des enroulements de stator endommagés peuvent être distingués par la forme du couple électromagnétique. L'observateur d'état par exemple [56], peut être utilisé pour mesurer ou estimer le couple électromagnétique.

#### I-5-4-2 Diagnostic par mesure de la vitesse

Les défaillances sont détectées en mesurant les fluctuations de la période de rotation du moteur. Cette méthode est particulièrement efficace pour détecter les défauts du rotor, les vibrations, l'excentricité, l'asymétrie du rotor, les roulements défectueux et des désalignements d'arbre. Toutefois, comme la machine fonctionne à des vitesses et à un couple variable, les instruments de mesure doivent pouvoir différencier les variations de vitesse causées par le couple de charge et les défauts du rotor [56].

## I-6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents composants d'une machine asynchrone ainsi que les dysfonctionnements les plus courants de la machine. Les erreurs sont principalement divisées en deux groupes : les erreurs électriques et les erreurs mécaniques. Cela inclut les défauts électriques, les défauts de rotor et les défauts de stator, mais les défauts mécaniques incluent les défauts de roulement, l'excentricité de l'entrefer., études statistiques ont également été présentées pour illustrer l'impact de ces pannes dans le domaine industriel, Poursuivant la présentation, les différentes méthodes de diagnostic utilisées pour la représentation et la détection de la machine asynchrone ont été abordées, Finalement, nous avons mentionné les techniques de diagnostic des mesures grandeurs, tel que flux, courant, couple électromagnétique ... etc., L'objectif du deuxième chapitre est la modélisation par simulation des machines asynchrones saines et différemment défaillantes selon la méthode des éléments finis.

## **Chapitre II**

### **Modélisation et simulation de la MAS par méthodes des éléments finis**

## II-1 Introduction

La modélisation par la méthode des éléments finis "Finite Element Method" (FEM), retenue parmi toutes les méthodes de modélisation utilisé pour la détection des différents défauts dans la machine asynchrone, offre un espace d'harmonique plus proche de celui de la machine réelle. Ceci permet une application fiable de la technique d'analyse des différents signaux de la machine. Une grande partie de ce chapitre sera consacré à cette modélisation avec une présentation détaillée des étapes nécessaires pour construire un modèle des éléments finis de la machine asynchrone sous logiciel Flux 2D®.

## II-2 Méthodes de modélisation des machines asynchrones

La méthode circuits internes équivalents, la méthode des circuits électriques magnétiquement couples, la méthode des réseaux de perméances et la méthode des éléments finis sont présentées comme les principales approches de la modélisation fine de la machine asynchrone avec cage défectueuse.

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

### II-2-1 Modélisation par les équations magnétiquement couples (CEMC)

Les enroulements constituant le stator et le rotor sont représentés par un circuit électrique équivalent formé par une inductance en série avec une résistance dans la modélisation par équations de circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC).

En outre, même si la méthode CEMC ne permet pas de prendre en compte certains phénomènes complexes (saturation, effet de peau, etc.), le modèle peut être corrigé à l'aide de coefficients globaux qui pouvant renseigner leur influence sur les grandeurs globales.

Malgré ses faiblesses, l'approche de modélisation CEMC offre un bon compromis en termes de précision, de temps de calcul et d'adaptabilité à la modélisation de la plupart des défauts électromagnétiques des machines asynchrones.

Le rotor est représenté par un circuit électrique comportant des mailles magnétiquement couplées comme le montre la figure (II.1) [57, 58].

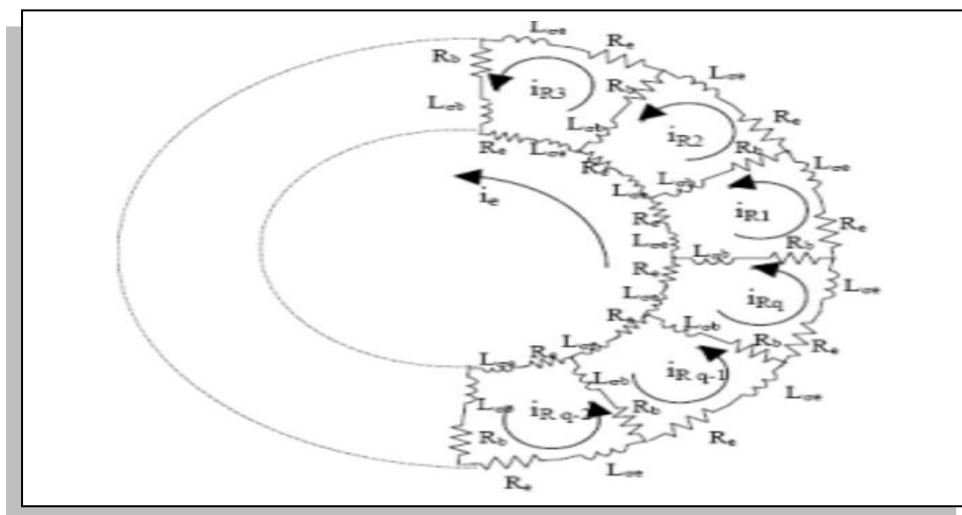


Fig. II.1. Schéma électrique équivalent à la cage rotorique [57].

L'approche de la CEMC pour écrire le modèle en trois phases de la machine asynchrone est basée sur un certain nombre d'hypothèses, dont les plus importantes sont:

- La perméabilité du fer (plaques) est infinie.
- Les pertes par courants de Foucault sont insignifiantes.
- Les courants inter-bars sont négligeables (feuille magnétique rotorique isolée des barres et des anneaux de la cage).

La première hypothèse peut être partiellement évitée en incluant l'onde de saturation fondamentale dans l'expression des perméances de l'entrefer

En conséquence, la chute de tension magnétique (f.m.m.) dans le fer peut être considérée [58].

Concernant la troisième hypothèse, il convient de noter qu'elle est partagée par toutes les méthodes de modélisation car les courants inter-bars sont difficiles à prendre en compte localement.

### II -2-2 Méthode des réseaux de perméances (RNM)

La méthode des réseaux de perméances [59] repose sur la décomposition du circuit magnétique étudié en tubes de flux, chacun ayant sa propre perméabilité.

Un réseau de perméance, semblable à un circuit électrique, est construit à partir de cette décomposition, les grandeurs impliquées étant des le flux et les différences de potentiels magnétiques. La modélisation des couplages avec les circuits électriques externes donne les sources de forces magnétomotrices (f.m.m). Dans le cas de la machine asynchrone, les sources f.m.m sont situées dans les dents du stator et du rotor, et leurs valeurs sont directement proportionnelles au courant dans les bobines concernées.

En conséquence, la machine asynchrone peut être décomposée en une série de circuits élémentaires constitués d'une dent, d'une encoche et de la portion de culasse concernée. Trois perméances (perméances de dent, perméances de culasse et perméance de fuite de pied d'encoche) et une source de (f.m.m) sont utilisées pour modéliser un circuit élémentaire (Fig. II.2).

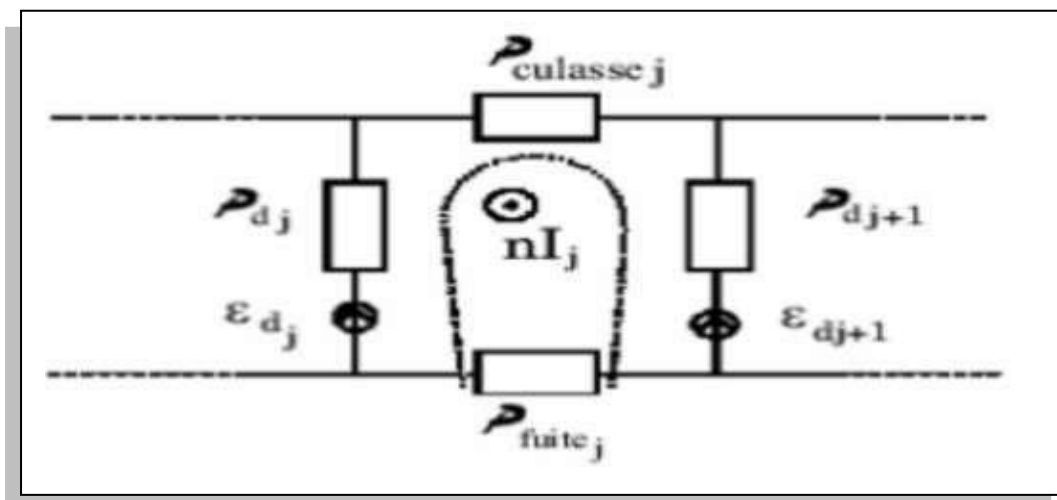


Fig. II.2 Réseau de perméances élémentaire autour d'encoche statorique [59].

La saturation magnétique peut être prise en compte lors du calcul des valeurs de perméabilité à l'aide de la méthode des éléments finis magnétostatiques. La mise en équations, l'obtention et la résolution du système d'équations différentielles non linéaires qui décrit le comportement électromagnétique et dynamique du système, ainsi que le logiciel de simulation de réseau de perméation à couplage électrique (SiRe PCE) développé dans l'environnement MATLAB, ont déjà été présentés en [60].

### II-2-3 Méthode des éléments Finis (MEF)

Méthode Elément finit (M.E.F) autorisent l'emploi d'éléments de forme à l'intérieur des quels le potentiel est approché par un polynôme ; la résolution se ramène à la minimisation d'un fonctionnelle liée à l'énergie emmagasinée dans les éléments.

L'utilisation des éléments finis en électrotechnique à débuté dans les années 1970 par la résolution de problèmes magnétostatiques.

Cette méthodologie s'est très vite imposée grâce à sa facilité d'emploi et à son aptitude à résoudre les équations de Maxwell dans des domaines de forme complexe.

Sans rentrer dans les détails, pour utiliser cette méthode on décompose le domaine d'étude en éléments triangulaires et on calcule ensuite la fonction inconnue aux nœuds du maillage ainsi obtenu. De nos jours, cette méthode permet la résolution de problèmes statique et dynamique.

L'utilisation de la méthode numérique de calcul par élément finis nous apport plusieurs avantages, la prise en compte de la géométrie de la machine, de la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotorique. D'autre part, d'un point de vue pratique, il est facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en changeant simplement les données du programme de calcul d'où une grande souplesse d'utilisation, [61].

Avec la méthode des éléments finis, l'approche courante qui donne de très bons résultats consiste à utiliser que l'équation de la conduction de chaleur pour l'ensemble de la structure, aussi bien dans les zones fluides que solides, [62].

#### II-2-3-1 Principe de la méthode des éléments finis

Le principe de base de la méthode des éléments finis réside dans la division du domaine dans les domaines élémentaires de dimension finie. Dans tout domaine appelé éléments finis, le vecteur potentiel dans un élément de cisaillement peut être obtenu en rapprochant les fonctions (fonctions appelées formes) dont l'expression varie d'un type à l'autre. Ces les fonctions d'approximation doivent assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La plupart des formes d'approximations potentielles d'un élément sont polynômes approximations[63].

Pour élément triangulaire on a:

$$A_e(x,y)=a+bx+cy \quad (II.1)$$

Pour les éléments quadrilatéral on a:

$$A_e(x,y)=a+bx+cy+dx \quad (II.2)$$

Les constants abc et sont à déterminer. Le potentielle est en générale non nul dans l'élément et nul ailleurs.

La valeur approchée du potentiel dans un point du domaine ( $\Omega$ ) de résolution est donnée par:

$$A(x,y) = \sum_{e=1}^{ne} A_e(x,y) \quad (II.3)$$

e: Numéro d'élément.

Ne: Le nombre totale des éléments du domaine( $\Omega$ ).

Le potentiel à tous les points d'un élément, ainsi que la densité de courant, sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels à ses trois sommets (Fig. II.3).

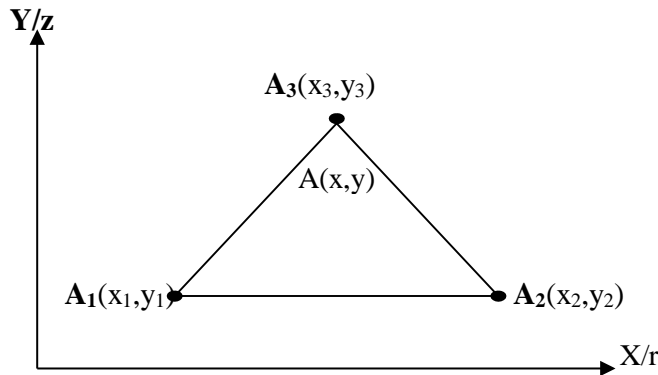


Fig.II.3: Fonction d'interpolation d'un élément.

### II-3 Présentation de logiciel Flux 2D

FLUX 2/3D est un logiciel de simulation multi-physique des systèmes appuyant sur la méthode des éléments finis. Il permet le calcul des états magnétiques, électriques et thermiques des dispositifs en régimes permanents et transitoires ou harmoniques, avec des fonctionnalités d'analyse multiparamétrique étendues, les couplages circuit et cinématique. Le Flux 2/3D est développé (en collaboration avec le G2ELab, fusion du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, du laboratoire d'électrostatique et matériaux diélectrique et du laboratoire de magnétisme du navire) et distribué en France par la société CEDRAT S.A. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de Circuits[64]

Les principaux modules permettant la simulation de tous systèmes physiques à l'aide de FLUX 2D sont présentés :

**-Module préprocesseur** : Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie du dispositif à étudier (PREFLU), de choisir et/ou de construire une banque de matériaux

(CLSMAT), d'affecter les propriétés physiques aux différentes régions géométriques prédéfinie (PROPHY) et de définir le schéma et/ou les données du circuit électrique (CIRFLU). Il permet également un maillage automatique d'une géométrie 2D prédéfinie (PREFLU).

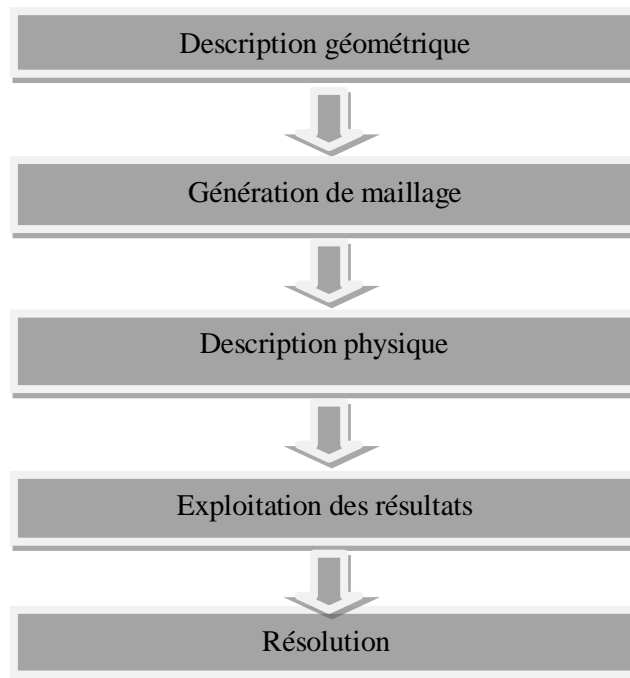
**- Module processeur** : Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER 2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

**- Module post-processeur** : c'est un module (Post-Pro 2D) 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

Prédéfinie. 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. Les développements informatiques de ce travail ont tous été réalisés en utilisant FLUX 2D, logiciel de calcul des champs par éléments finis. Ces développements à consistés à implanter les formulations présentées dans le chapitre précédent et à intégrer les lois de comportements.

La **figure(II.4)** présente la démarche générale utilisée pour implémenter le modèle éléments finis à l'aide de FLUX2D

Cette démarche est détaillée dans l'étape suivante:



**Fig.II.4:**Démarche générale pour l'implémentation du modèle en Flux,[65].

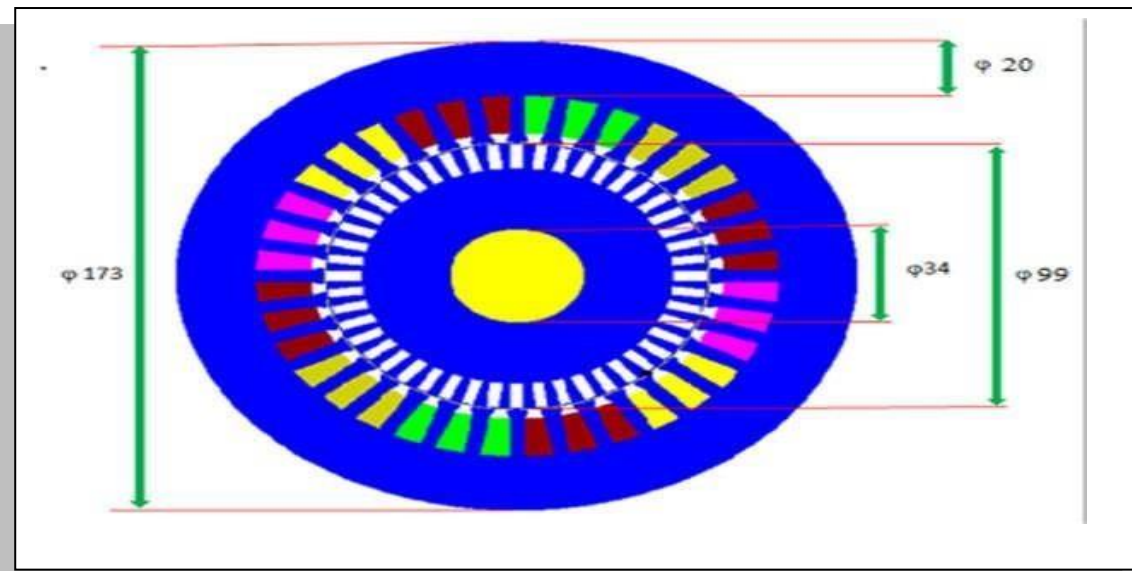
## II-4 Application à la simulation de la machine asynchrone

Les caractéristiques de la machine asynchrone étudiée sont données dans le tableau (II.1)

Partie	Paramètre	Valeur	Unit é
<b>Machine</b>	Puissance nominale	2.2	<b>KW</b>
	Tension nominale	220	<b>v</b>
	Vitesse nominale	1440	<b>tr/m</b>
	Nombre de pôles	4	
	Fréquence	50	<b>Hz</b>
	Longueur active	97	<b>mm</b>
<b>Stator</b>	Nombre de phases	3	
	Type de connexion	<b>Y</b>	
	Nombre d'encoches	36	
	Diamètre interne	99	<b>mm</b>
	Diamètre externe	173	<b>mm</b>
<b>Rotor</b>	Diamètre externe	98.1	<b>mm</b>
	Diamètre interne	34	<b>mm</b>
	L'épaisseur de l'entrefer	0.33	<b>mm</b>
	Nombre de barres	48	

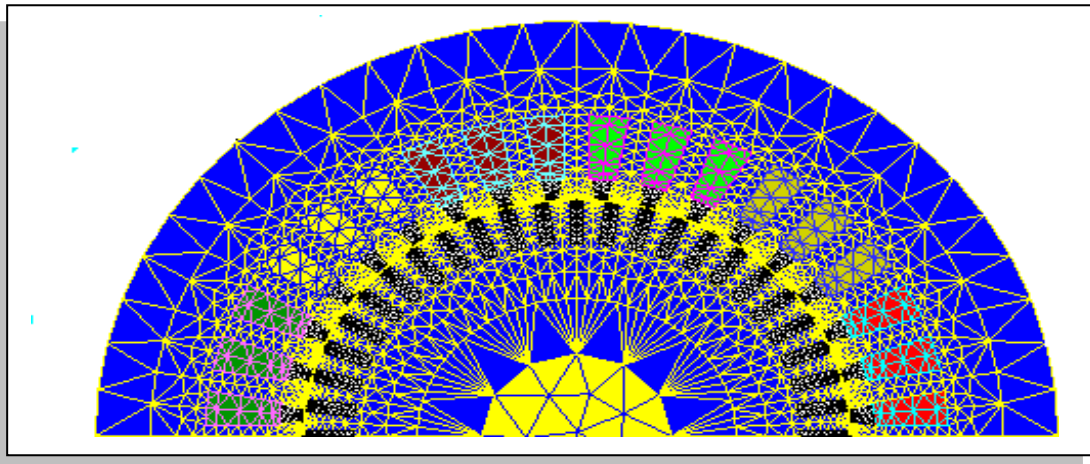
**Tableau II.1:** Caractéristique de la machine étudiée

La figure(II.5) représenté la géométrie de la machine étudiée et les Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique



**Fig.II.5:** géométrie de la machine étudiée.

La figure(II.6) représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine



**Fig.II.6:** Répartition du maillage.

Le réseau est le plus dense près de la brèche d'air, puisque l'énergie électromagnétique est générée dans cette zone. D'autre part, le maillage est plus épais vers l'axe et l'extérieur de la culasse afin de raccourcir le temps de calcul sans perte significative d'information. Comme le cadre extérieur de la machine est conducteur et généralement relié à la terre, nous appliquons la condition Dirichlet autour du contour entier du potentiel zéro-vecteur, machine pendant nos simulations.

#### II-4-1 Les matériaux conducteurs

Pour que les conducteurs du stator sont uniformément répartis dans les encoches, cette zone se voit attribuer la résistivité du cuivre pour une température d'enroulement donnée, le gonflement et le nombre de tours par encoche. Au niveau du rotor, nous utilisons la résistivité de l'aluminium à une température fixe.

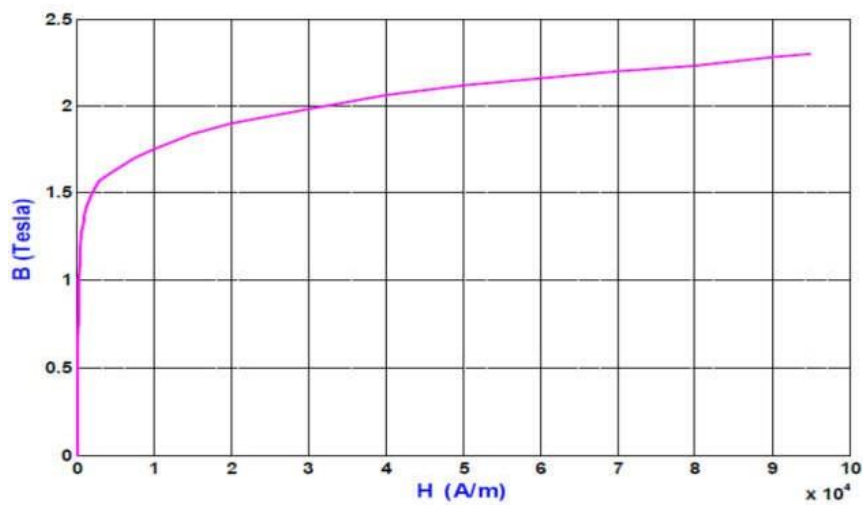
#### II-4-2 Les matériaux magnétiques

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

H [A/m]	B[T]	H [A/m]	B[T]	H [A/m]	B[T]	H [A/m]	B[T]
0	0	400	1.1	3000	1.57	30000	1.98
100	0.2	500	1.18	4000	1.6	40000	2.06
120	0.38	700	1.28	5000	1.63	50000	2.12
160	0.62	900	1.34	7500	1.7	70000	2.2
200	0.78	1000	1.37	10000	1.75	80000	2.23
250	0.92	1400	1.39	15000	1.84	90000	2.28
300	1.01	2000	1.5	20000	1.9	95000	2.3

**Tableau .II.2:** $B(H)$  du matériau magnétique fer.

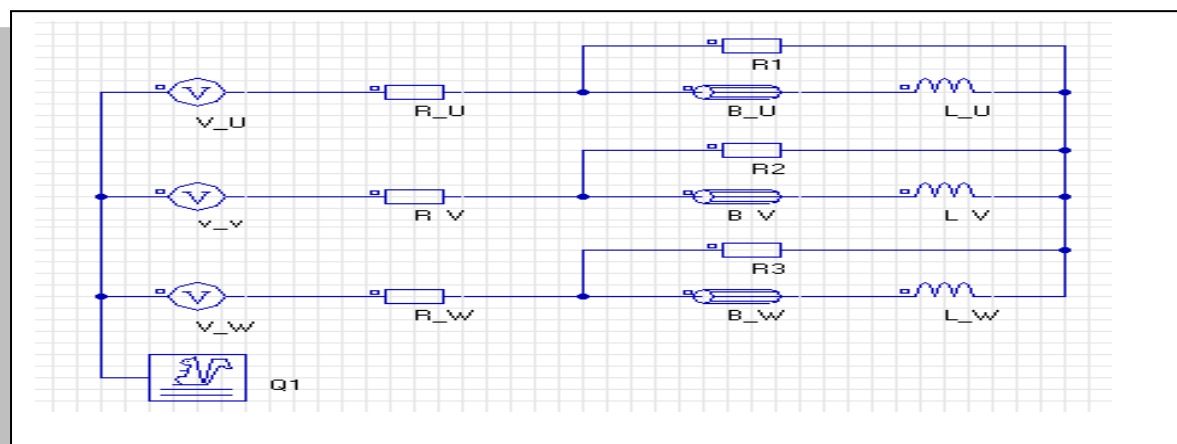
La courbe B(H) du circuit magnétique est représentée ci-dessous.



**Fig.II.7:** Caractéristiques B(H) du matériau magnétique fer.

Pour représenter avec précision le moteur, il faut tenir compte des effets des membres (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court-circuit). Le circuit électrique illustré (II.8) représente :

- Les sources de tension d'alimentation ( $V_U, V_V, V_W$ );
- Le bobinage statorique ( $B_U, B_V, B_W$ );
- Les inductances de fuite, ( $L_U, L_V, L_W$ )
- Les résistances de chute de tension dans le réseau ( $R_U, R_V, R_W$ ) sont négligeables;
- Les résistances des voltmètres pour mesurer la tension statorique  $R_1, R_2, R_3$  sont également négligeables.

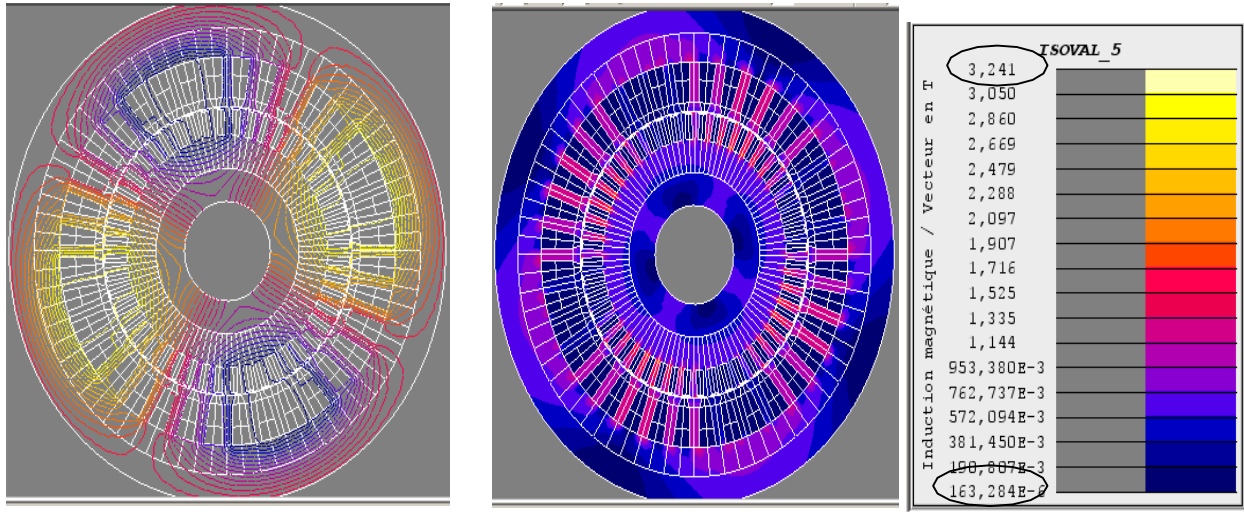


**Fig.II.8:** Circuits représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.

## II-5 Résultats de simulation

### II-5-1 Résultats graphiques

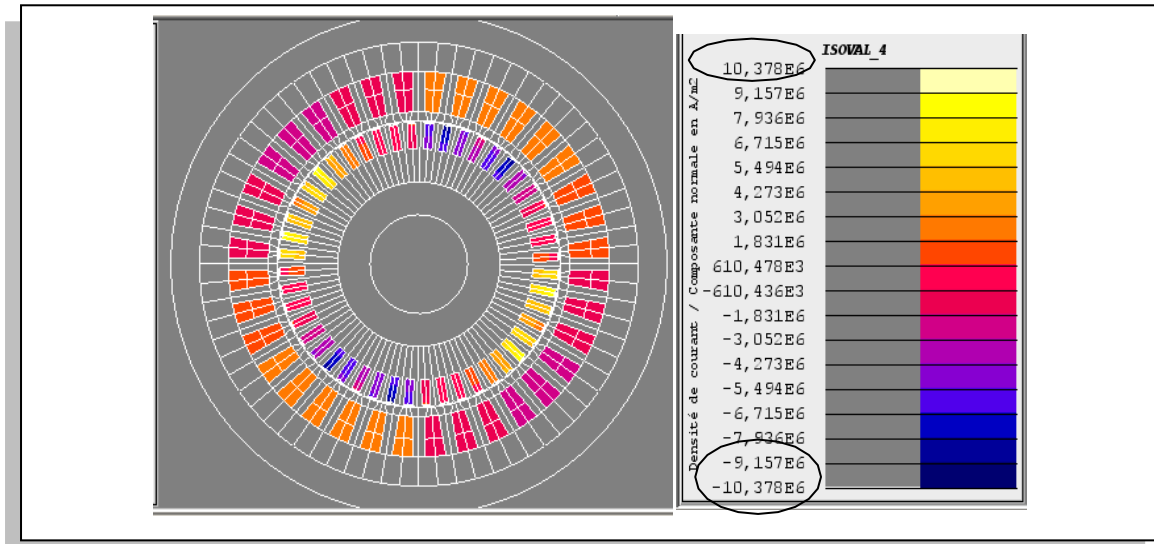
Le résultat de simulation suivant représente la distribution des lignes du flux à l'extérieur et l'induction dans la machine pour un fonctionnement nominal.



**Fig. II.9:** Répartition : lignes du flux à l'extérieur et l'induction magnétique pour le fonctionnement nominale à  $t=1.5s$ .

Selon les résultats précédents, la distribution de : lignes du flux à l'extérieur d'induction est presque symétrique par rapport à l'axe de symétrie des pôles de la machine.

La figure(II.10) représente la densité de courant dans les barres de rotor au fonctionnement nominal.



**Fig.II.10:**Densité du courant dans les barres au fonctionnement nominale à  $t=1.5s$

On constate aussi que la répartition de courants rotorique est symétrique.

### II-5-2 Analyse des caractéristiques de la machine

Les courants du stator atteignent la vitesse de vide à l'état d'équilibre de 2,57A après une vitesse transitoire (Fig. II.11) d'environ 0,172s pendant la quelle la machine magnétise, et atteignent la valeur de 4,24A après l'application de la charge à  $t=0,4$ . Les figures (II.12, II.13) représentent le couple électromagnétique et la vitesse de la machine.

Il est à noter que le couple prend de grandes valeurs dans la vitesse transitoire et se stabilise à une valeur de 14,35N.m à l'état stable, et la vitesse est atteinte à la valeur nominale 1421tr/min à l'état stable.

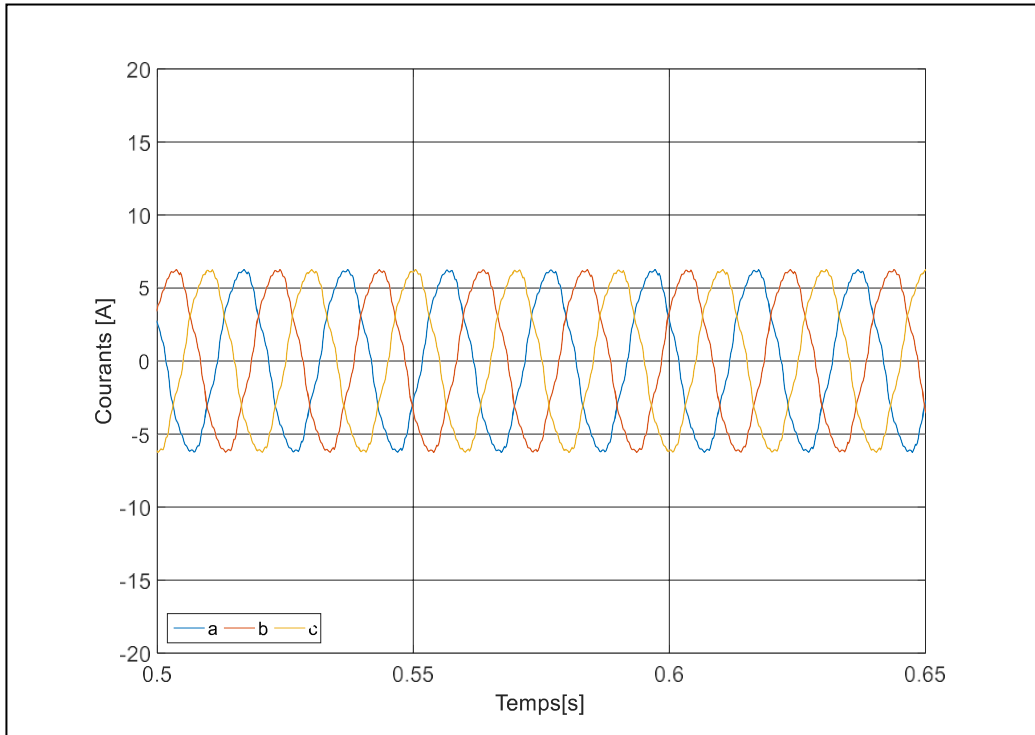


Fig.II.11:Courant de phase en fonction du temps.

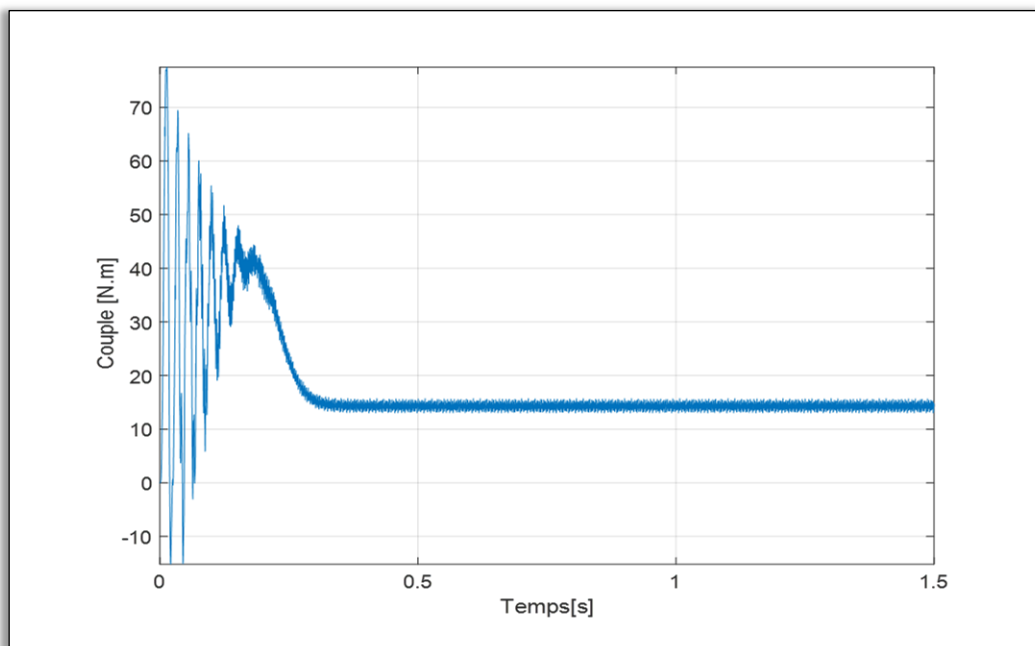


Fig.II.12:couple en fonction de temps.

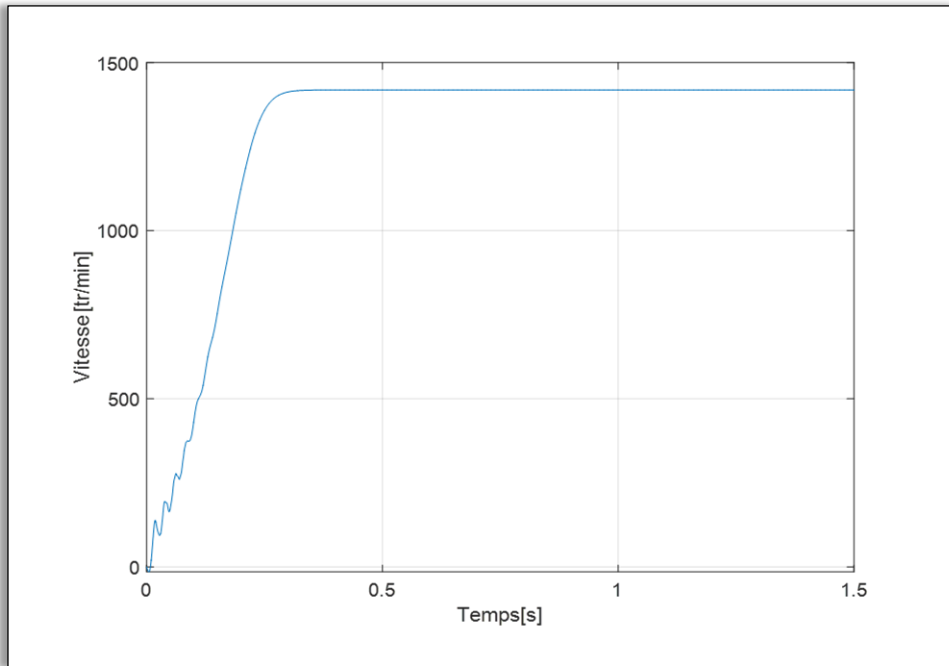


Fig.II.13: la vitesse en fonction de temps

## II-6 Modélisation de flux fuit

### II-6-1 Champ de dispersion des machines à courant alternatif

Dans une machine électrique tournante, le flux de fuite est créé par différents éléments de la machine. Une répartition de ces lignes de champ d'après Thomson [50] est donnée dans la Figure II.14.

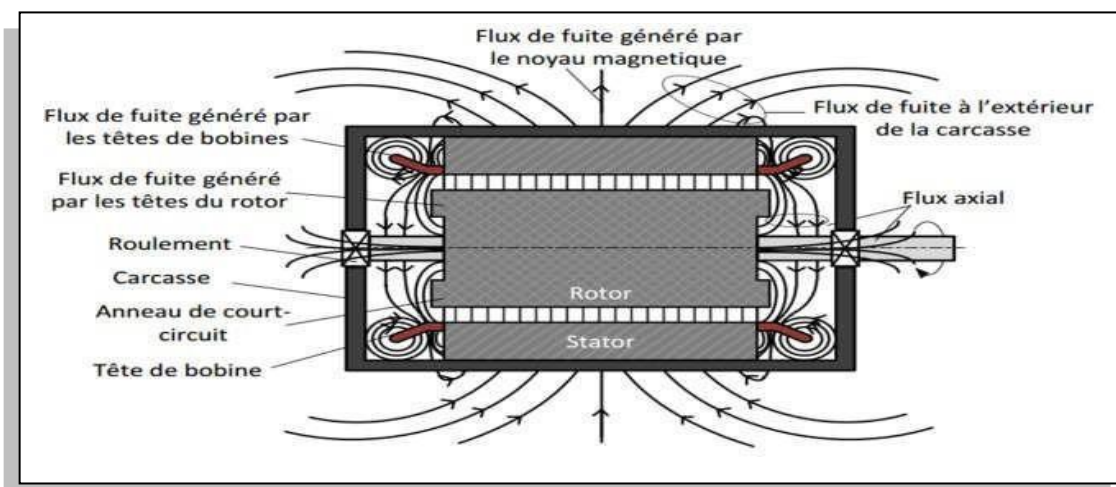


Figure II.14 : Répartition de lignes de flux de fuite dans une machine électrique.

D'après la répartition des lignes de champ, on peut décomposer le champ extérieur en de deux parties appelées champs externes axial et radial. Ces deux champs se combinent pour former le champ de dispersion : le champ axial situé dans un plan qui comprend l'axe de la machine, il est généré par les courants dans les têtes de bobines de la machine (ou l'anneau de court-circuit) ; le champ radial situé dans un plan perpendiculaire à l'axe de la machine, c'est une image de l'induction d'entrefer qui est atténuée par

Le circuit magnétique statorique (paquet de tôles) et par la carcasse extérieure de la machine. Le champ radial peut être décomposé en composante normale et composante tangentielle. Il peut contenir une composante provenant des têtes de bobines comme indique sur la Figure II.15.

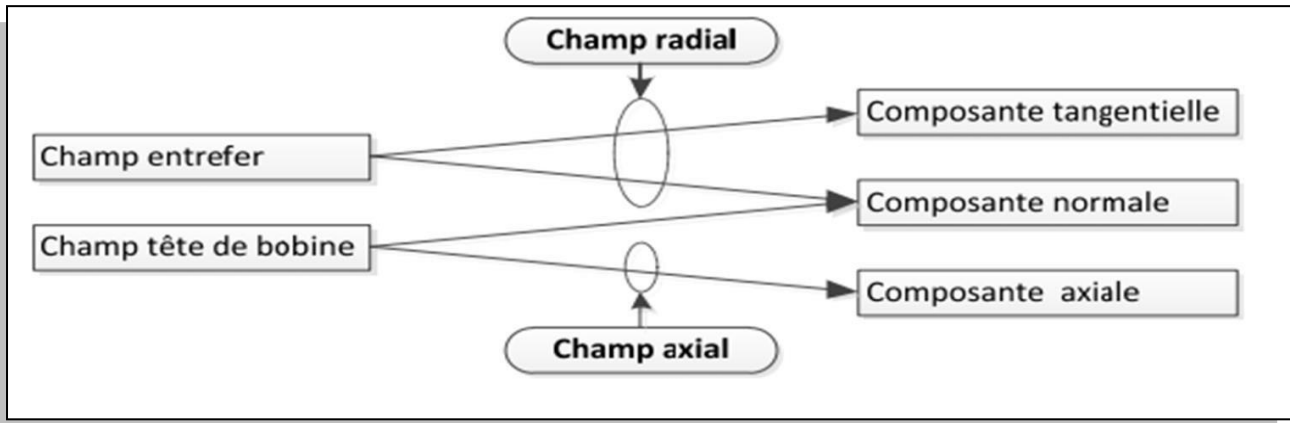


Figure II.15 : Parties du champ extérieur

Le flux de dispersion peut donner une information sur la présence d'un défaut, parfois la localisation de celui-ci. D'un point de vue diagnostic, l'avantage des méthodes basées sur la mesure du champ de dispersion est qu'elles sont non invasives [51]. Ces méthodes sont simples à mettre en œuvre, elles consistent à disposer un capteur à la périphérie du moteur et de récupérer le signal du champ de fuite (voir Figure II.16). Or, selon la position du capteur, le champ mesuré n'émane pas forcément du même endroit, et ne résulte, par conséquent, pas forcément du même phénomène physique [32].

La Figure II.16 montre les différentes possibilités de mesure du champ de dispersion à l'aide d'un capteur bobiné.

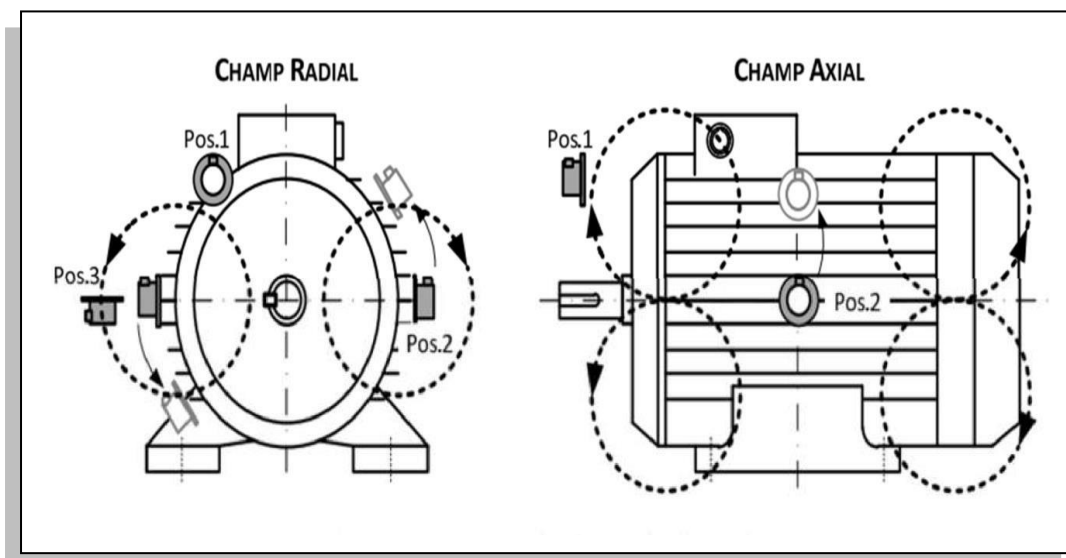


Figure II.16 : Mesure de champ de dispersion

Du fait de la circulation supposée des lignes de champ, le capteur sera plus sensible au champ axial ou radial, selon la position de cette bobine sur le pourtour de la machine. Si la bobine est

Plaquée en position 1 (Pos.1), elle va mesurer le champ axial. Dans ce cas l'amplitude du flux mesuré est maximale au niveau des flasques (près des têtes de bobines), et que le minimum se situe au milieu de la longueur de la machine ; ce minimum étant pratiquement nul. Si la bobine est plaquée en position 2 (Pos.2), elle va mesurer le champ radial, mais elle peut également embrasser une partie du champ axial selon que le capteur est plus ou moins éloigné des têtes de bobines. La position 3 (Pos.3) correspond à la mesure du champ qualifié de "radial pure" puisque, en théorie, aucune ligne de champ axial ne peut traverser la section du capteur bobiné dans cette position.

### II-6-2 Simulation de champ de fuite par MEF

Le figure II.17 est représentent Model de la machine avec un capteur externe.

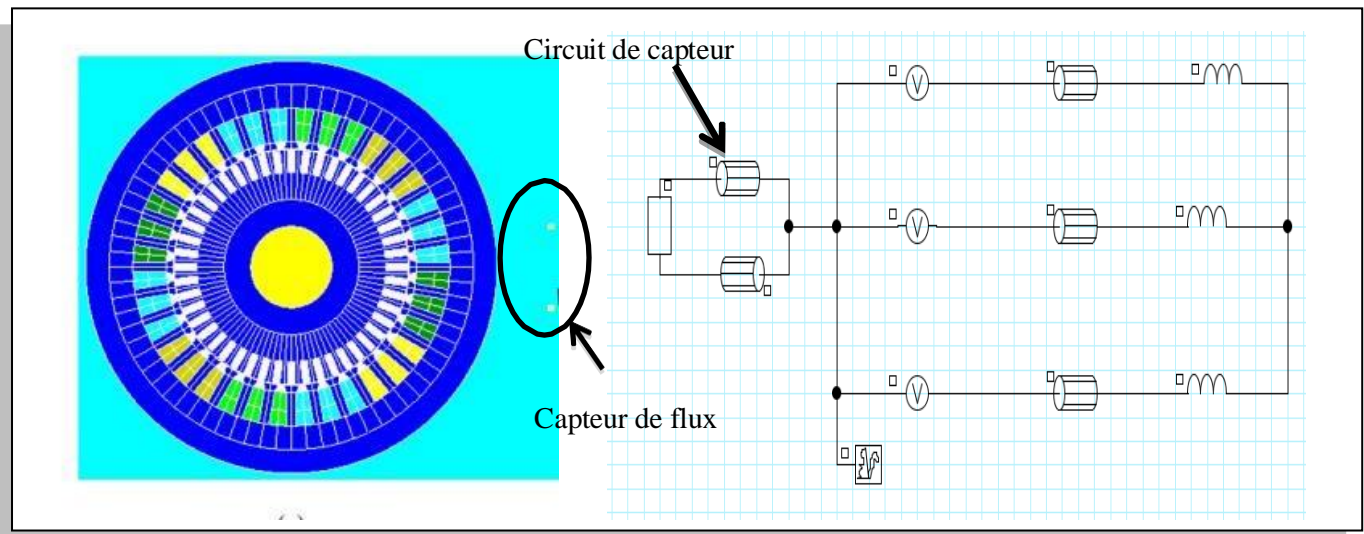


Fig. II.17. Model de la machine avec un capteur externe.

Dans cette partie nous avons étudié la réparation des lignes du flux à l'extérieur de la machine pour l'état sain, le figure II.18 représentent le champ de fuite résultat graphique in état sain

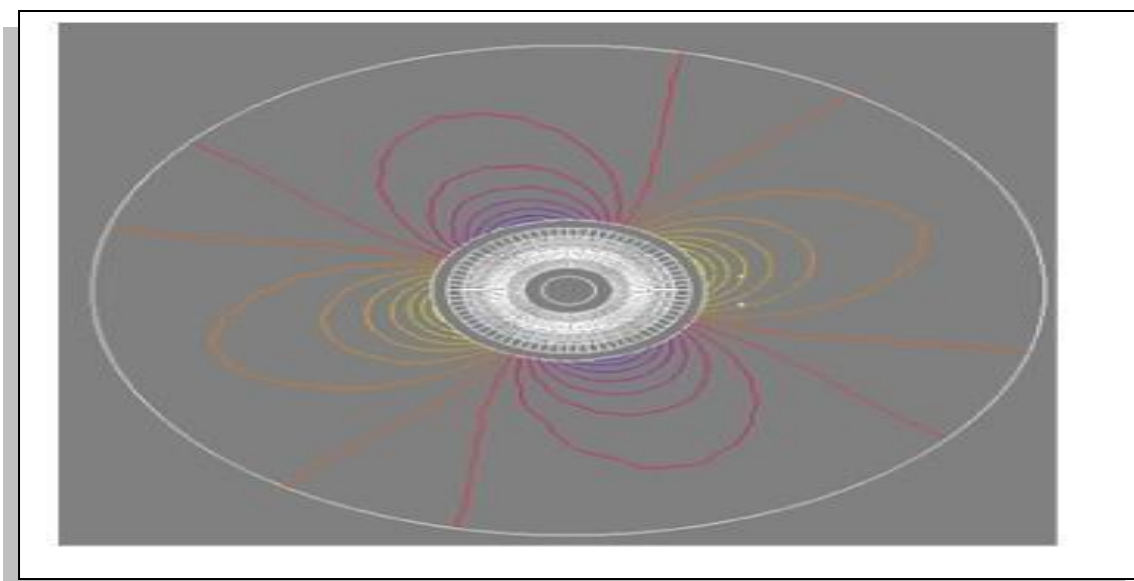
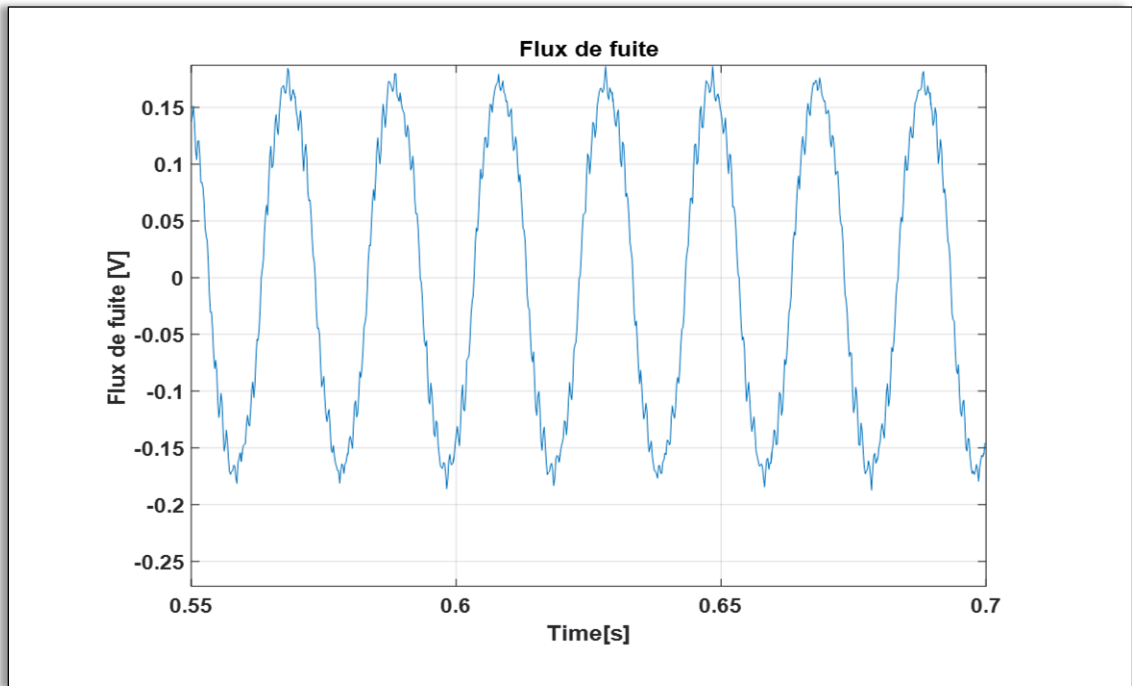
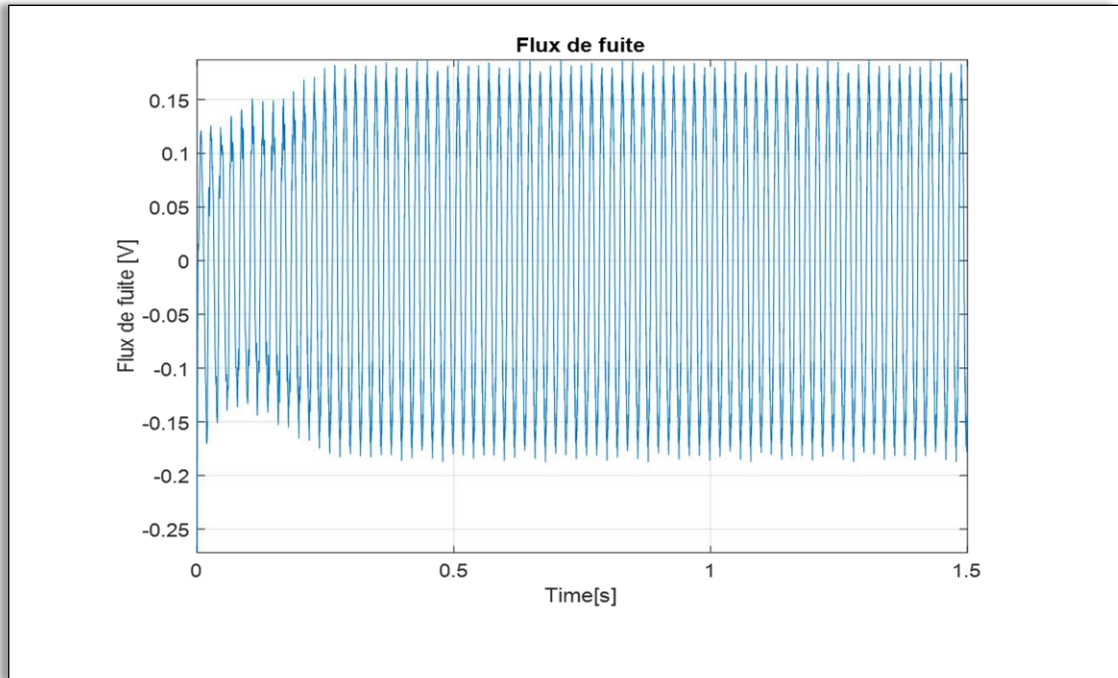


Fig. II.18 : lignes du flux à l'extérieur

Les flux de fuite représentés à la figure (II.19)




**Fig.II.19:** flux de fuit en fonction de temps

## **II-7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présentées différentes méthodes de modélisation de machine asynchrone et nous avons développé un modèle basé sur la méthode d'éléments finis qui nous permet de prendre en considération la géométrie exacte de la machine ,la non linéarité des matériaux magnétique, ...etc. . La simulation de magnéto transitoire nous a permis d'étudier les grandeurs locales, et globales dans la machine (courant, couple, vitesse, flux de fuit).

L'objective de troisième chapitre est diagnostic des défauts de stator de la machine.



**Chapitre III : diagnostic  
des défauts de la machine  
asynchrone**

### III-1 Introduction

Le diagnostic des défauts de machines asynchrone se récemment devenue ncessaire dans les exigences imposées par les exploitants et les producteurs. À cet regarde, le développement des outils de diagnostic capables de détecter rapidement les défauts de ces machines, est nécessaire.

L'analyse spectrale est la méthode la plus utilisé en diagnostic des défauts. En général, la seule quantité intéressante accessible au stator est le courant, et le but de son analyse spectrale est de détecter et d'identifier l'élément défectueux en fonction de sa fréquence.[]

Les signatures causées par une cassure de barre, une excentricité et un court-circuit ont été identifiés à l'aide d'une analyse spectrale du courant stator.[]

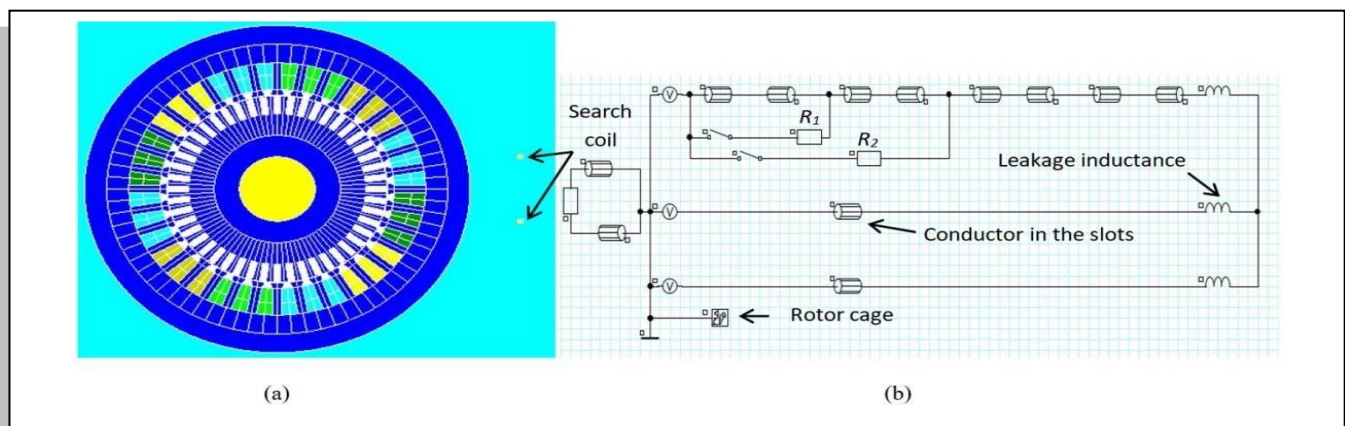
L'amplitude de 3<sup>eme</sup> harmoniques dans le spectre de courant du stator fournit des informations supplémentaires précieuses pour le diagnostic des défauts de court-circuit inter spire.

Récemment, il y a des travaux qui sont utilisé l'analyse de champ magnétique de fuite [] cette méthode de diagnostic est non invasive et riche en information para port aux méthodes de courant [].

Dans ce chapitre nous allons proposer une méthode de diagnostic basée sur l'analyse de champ magnétique de fuit à l'extérieur de la machine, en utilisant un capteur de type bobine.

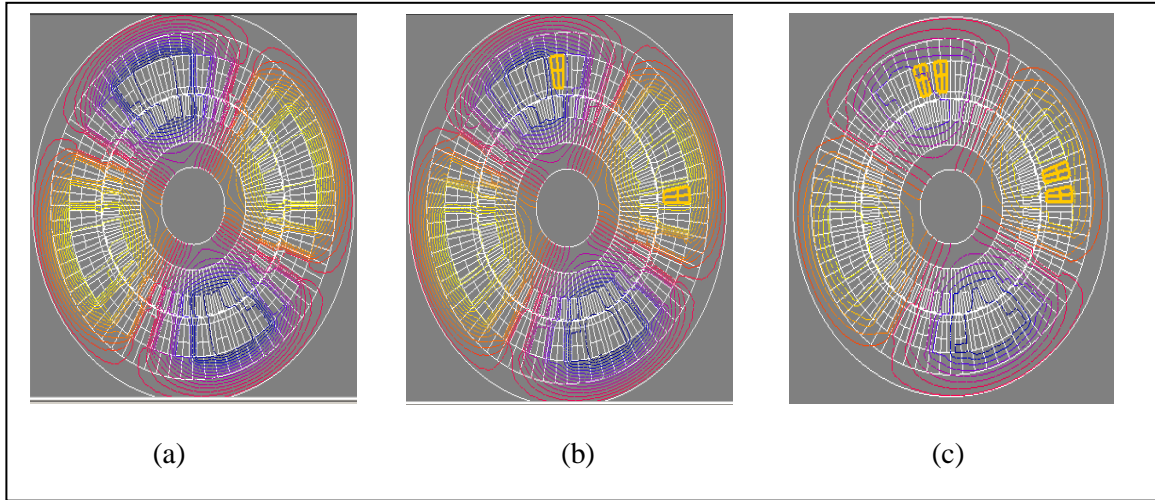
### III-2 Simulation de défaut de court-circuit

Les figures suivantes montrent le circuit électrique modifié pour réaliser le court-circuit entre spire dans la machine. Les résistances  $R_1$  et  $R_2$  permettent de réaliser un court-circuit de 40 et 80 spires respectivement.



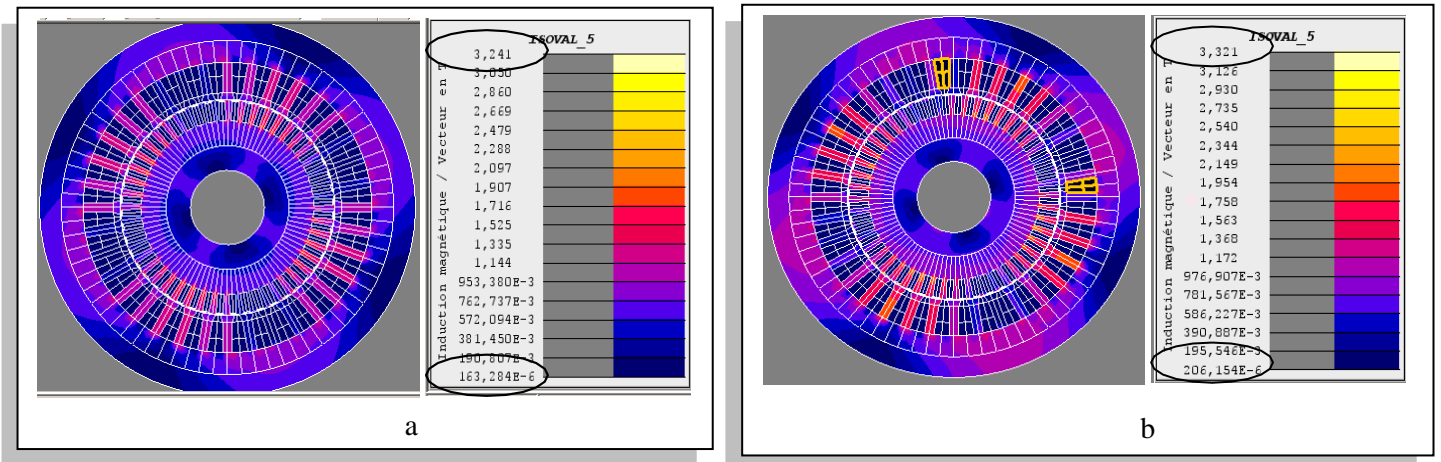
**Fig.III.1:** Analyse MEF pour le calcul du champ magnétique (a) géométrie du MAS (b) modèle de circuit électrique

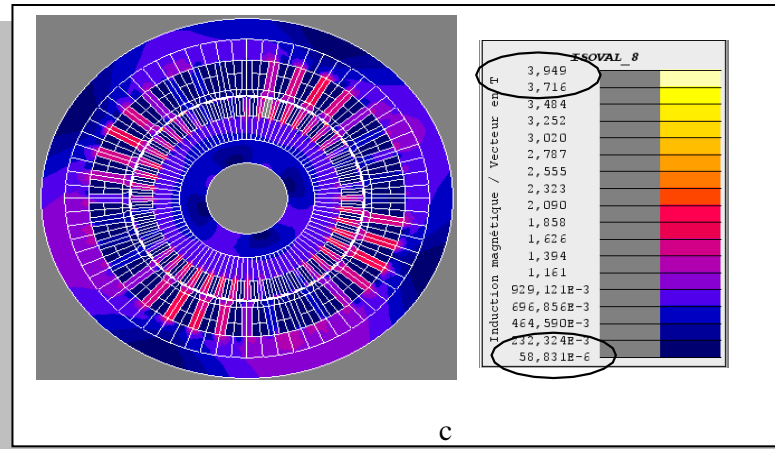
Les figures (III.2) représentent le champ magnétique interne dans la machine saine avec défaut de court-circuit entre spire au stator.



**Fig.III.2:** la Répartition des : lignes du flux à l'extérieur à  $t=1.5s$ :(a) machine saine,(b)court-circuit 40 spires,(c)court-circuit 80 spires.

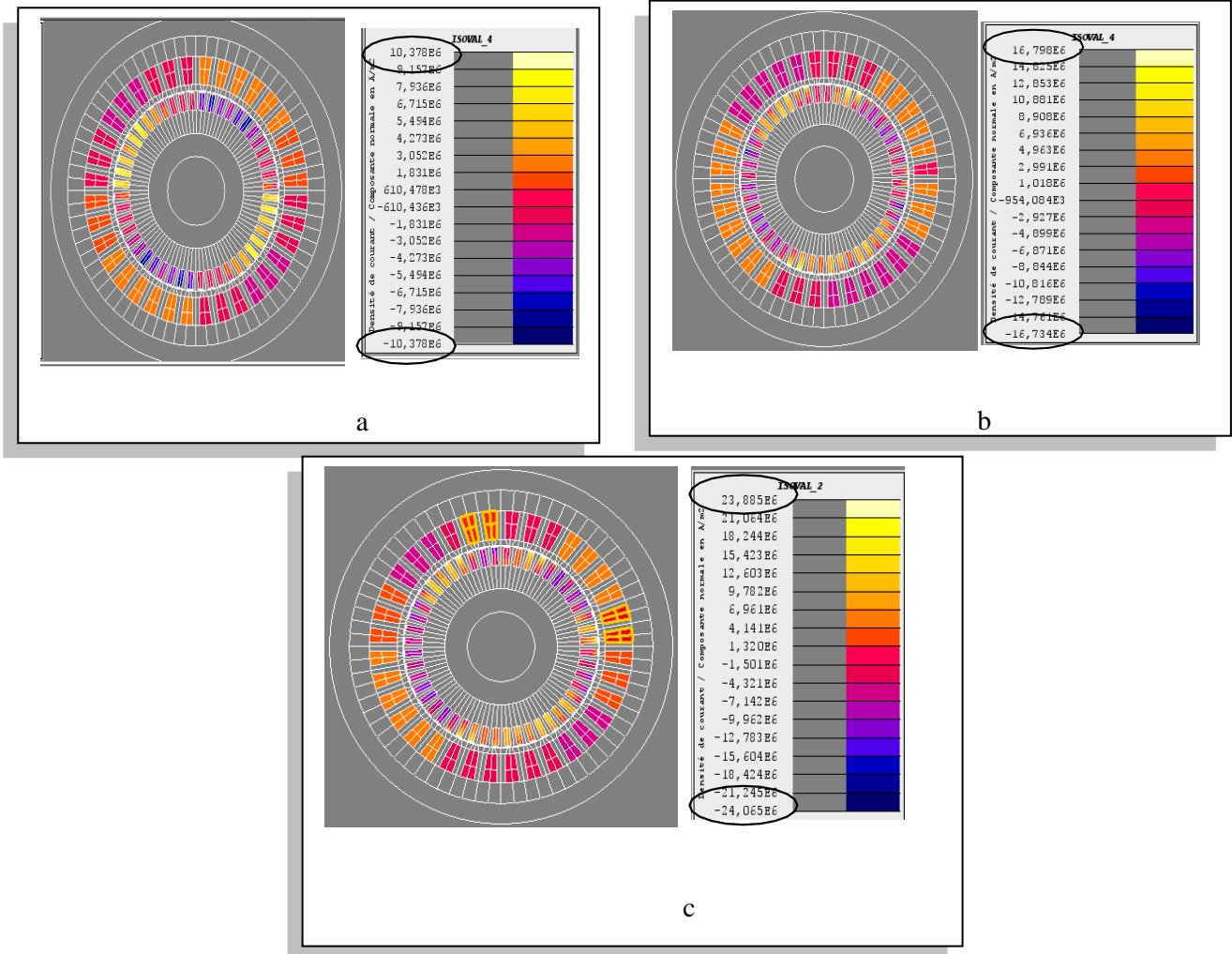
Les figures(III.3) représentent de l'induction dans le circuit magnétique interne dans la machine sain avec défaut de court-circuit entre spire au stator.





**Fig.III.3:** Répartition de l'induction dans le circuit magnétique : (a) machine saine , (b) court-circuit 40spires , (c) court-circuit 80spire

Les figures III.4 représentent de densité de courant de court-circuit



**Fig.III.4:**la Répartition de densité de courant à  $t=1.5s$ :(a) machine saine,(b) court-circuit 40 spires,(c)court-circuit 80spires.

Nous observons une fluctuation de lignes du flux à l'extérieur de distribution des lignes et de l'induction dans la figure du circuit magnétique (III.2, III.3), en plus, la densité de courant aussi qui augmente en fonction du nombre de défaut de court-circuit (fig. III.4).

Les figures (III.5, 6,7,8) illustrent diverses caractéristiques de la machine, comme le courant de phase, le couple, la vitesse de rotation et le flux de fuit

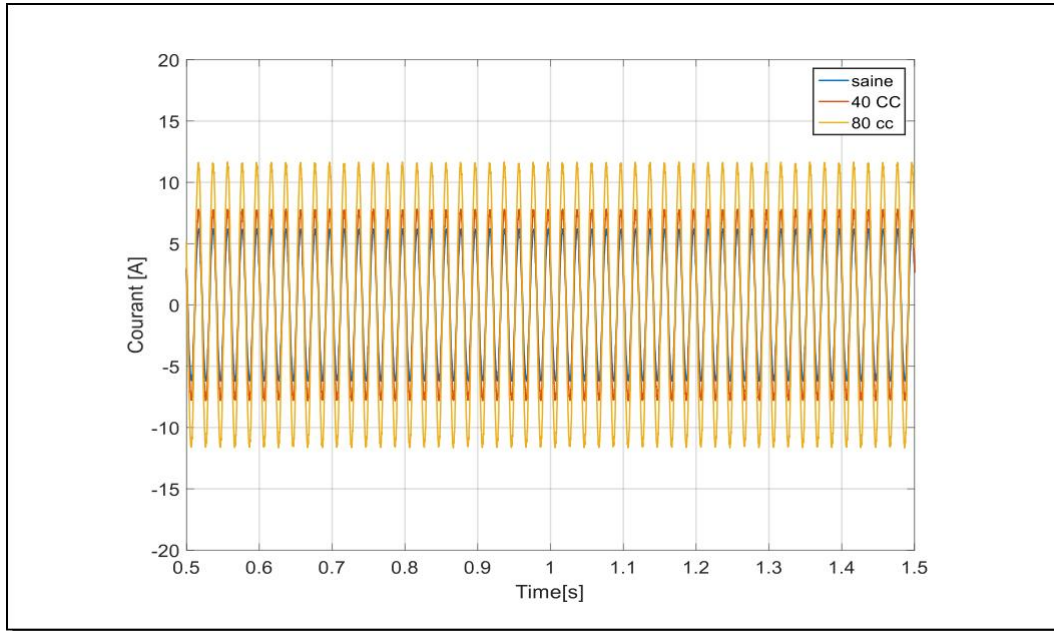
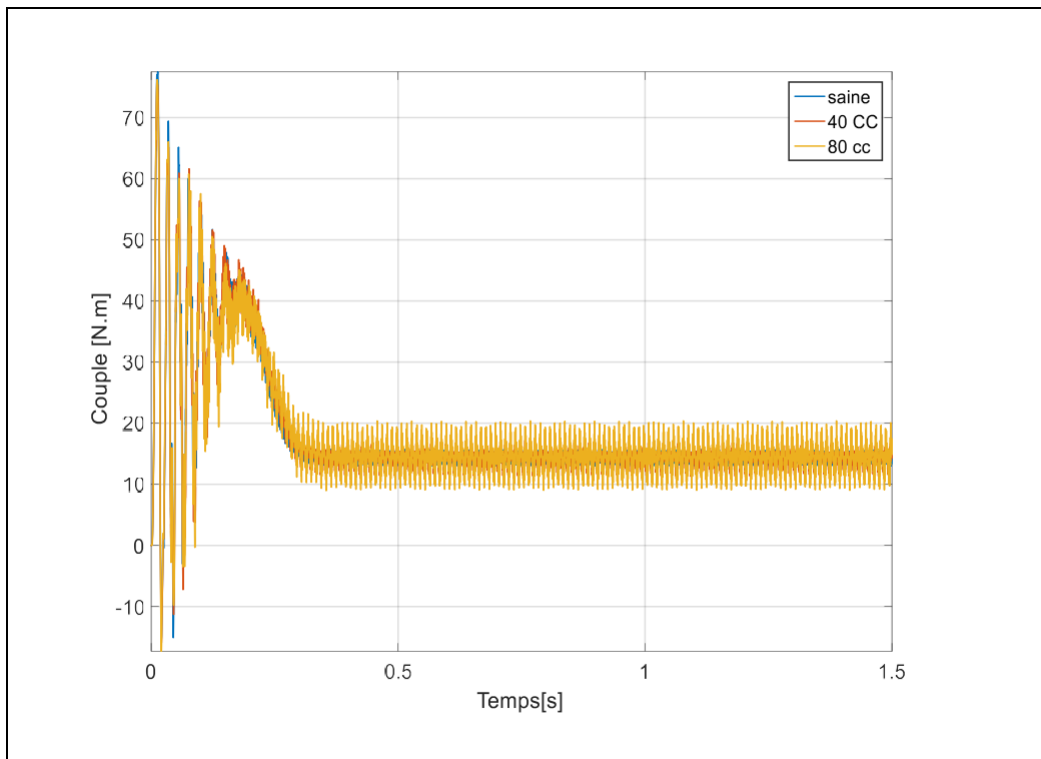


Fig.III.5:le courant de la phase avec défauts.



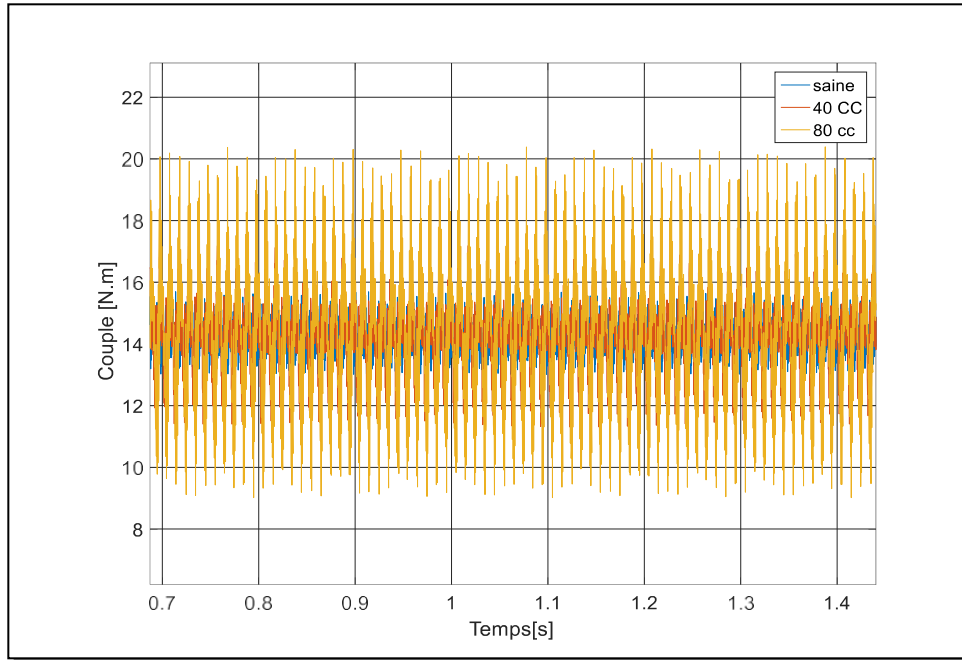
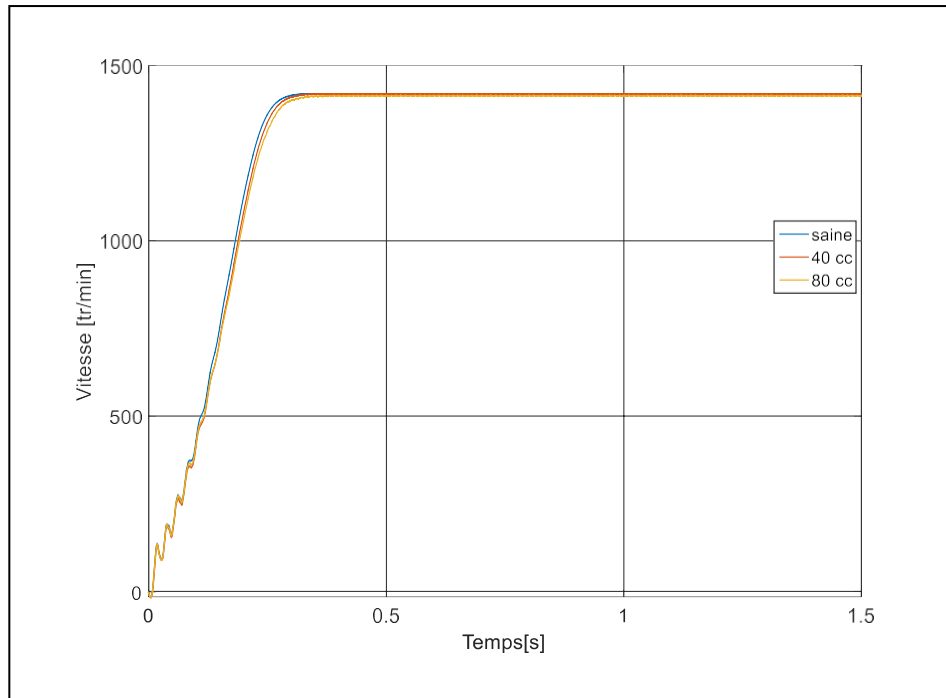


Fig.III.6:la couple avec défauts .



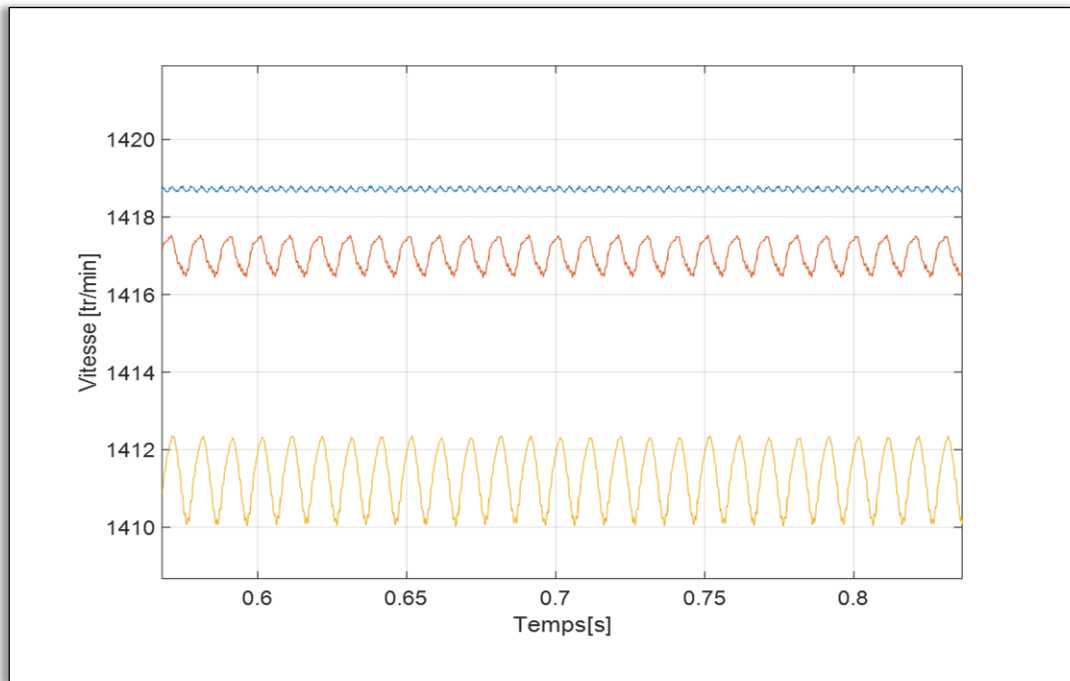
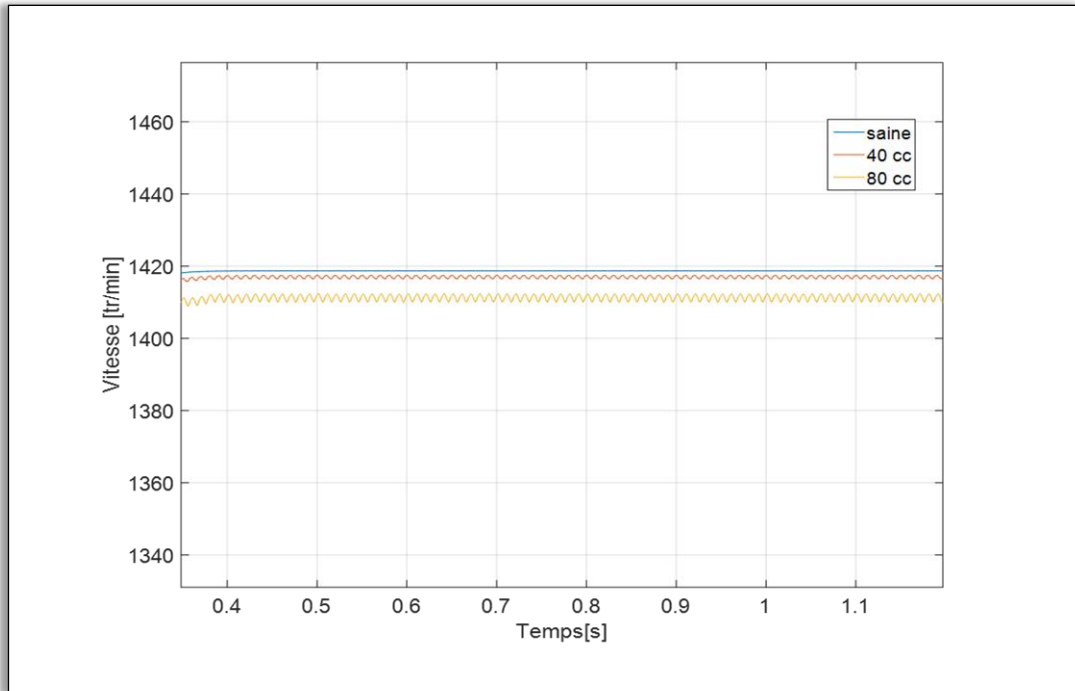
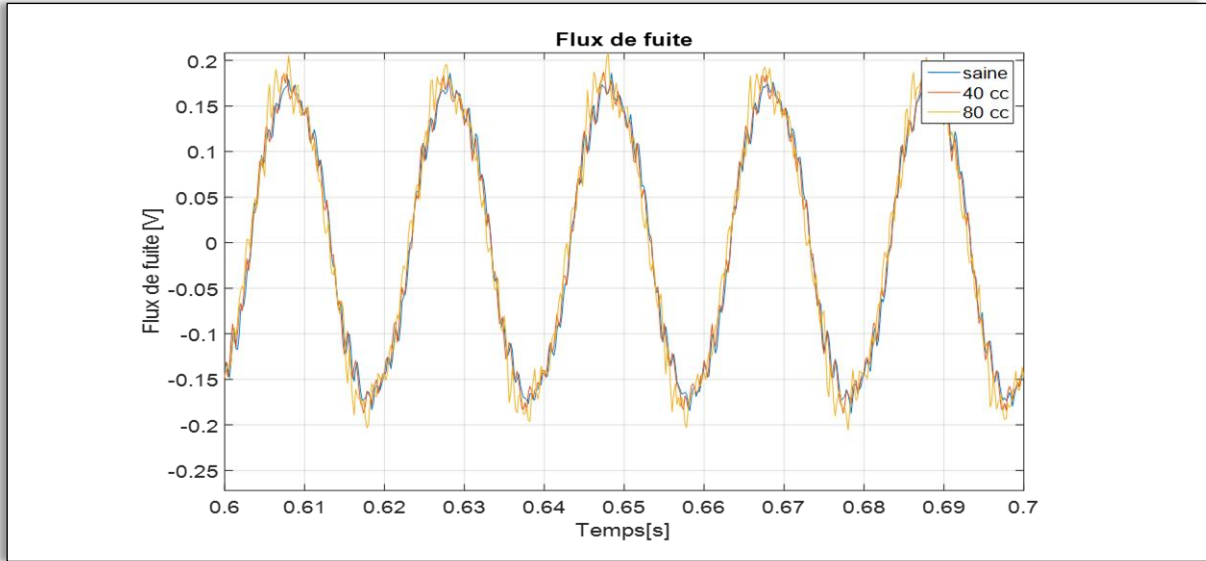


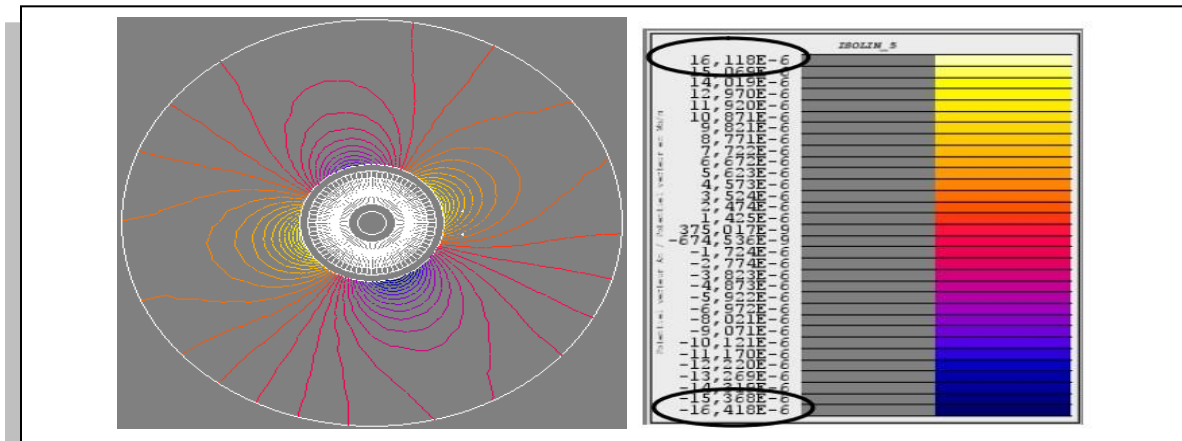
Fig.III.7: la vitesse avec défauts.



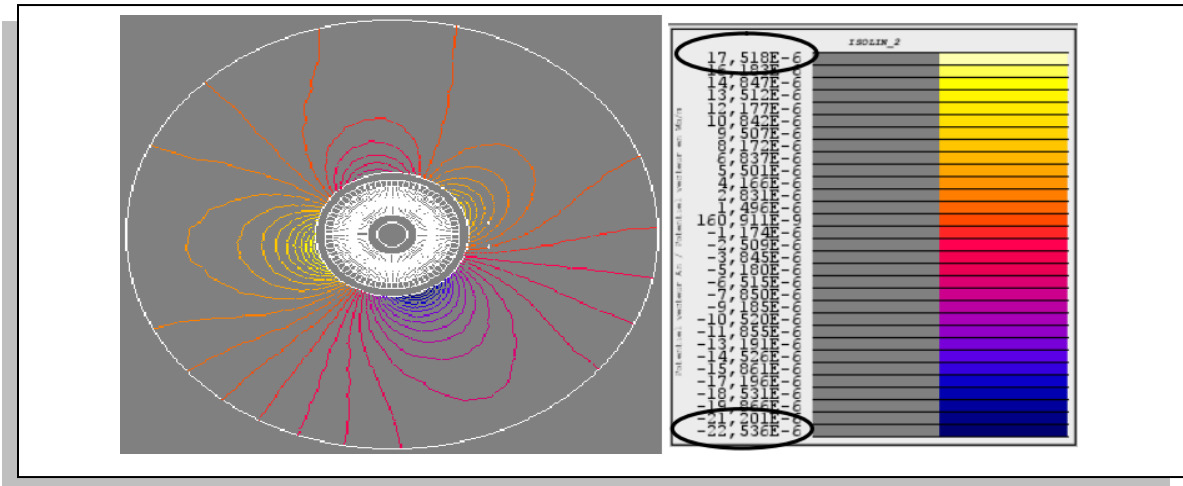
FigIII.8 : flux de fuit avec défauts.

L'amplitude du courant dans la phase défectuelle augmente notablement; les courants dans les autres phases augmentent également, mais l'augmentation est moins importante que dans la phase défectueuse. Avec la croissance du couple électromagnétique, nous voyons des oscillations de vitesse, qui augmentent proportionnellement au nombre de spirales de court-circuit.

Les figures III.9 représentent les lignes du flux à l'extérieur de la machine pour les défauts statorique suivants : (a) court-circuit 40 spires, (b) court-circuit 80 spires.



a



b

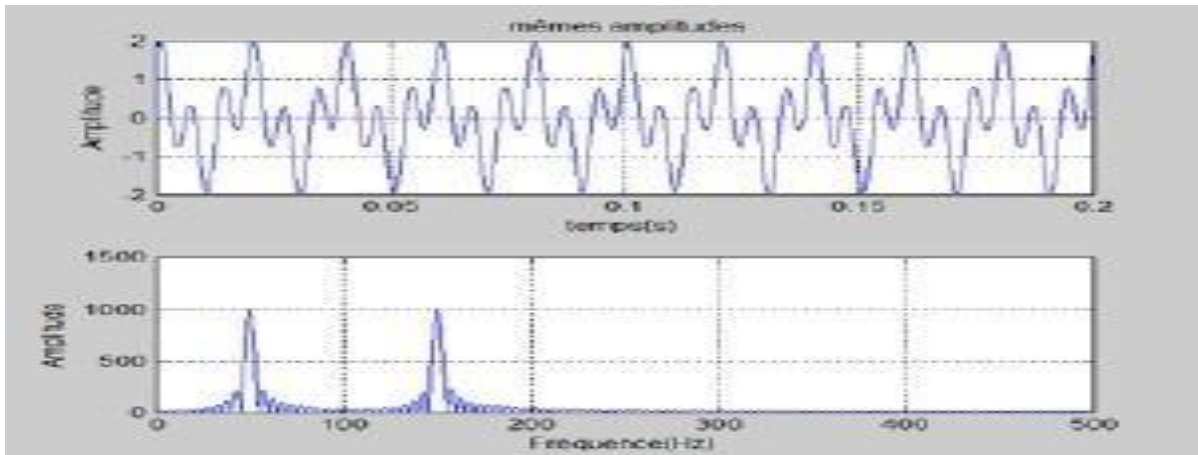
**Fig. III.9:** Lignes de champ magnétique à l'extérieur de la machine avec défaut de court-circuit : (a) court-circuit 40 spires, (b) court-circuit 80 spires.

On remarque que pour la machine avec défauts, les lignes de champ magnétique est fortement déséquilibré en fonction de nombre de spire en court-circuit.

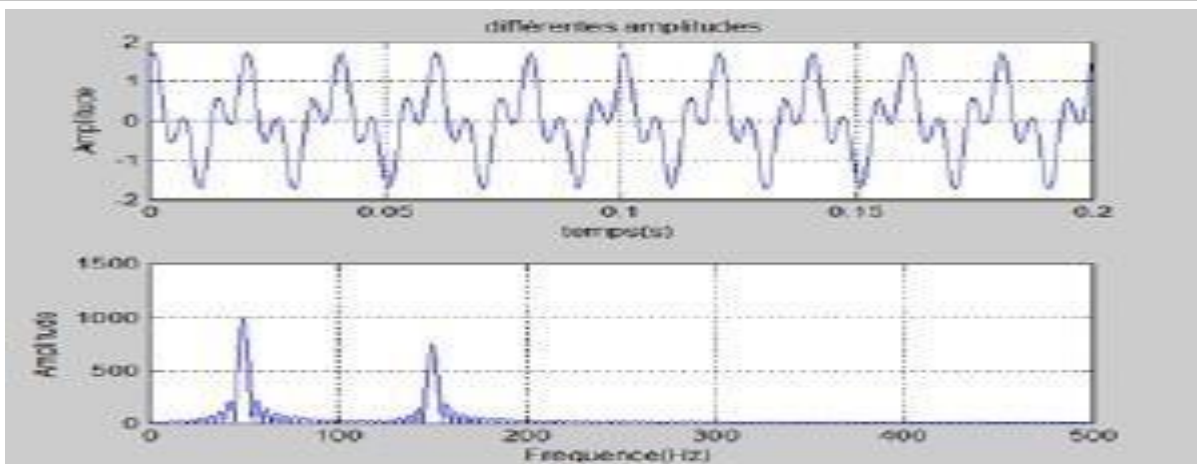
### III-3 Transformée de Fourier rapide (FFT)

J. W. Cooley et J. W. Tuckey ont inventé la transformation de Fourier rapide en 1965 comme une approche mathématique pour les calculs rapides. La transformée de Fourier discrète peut être réduite des opérations  $N^2$  à  $N \cdot \log(N)$  à l'aide de la FFT. De nombreux problèmes d'analyse du spectre ont été facilement résolus grâce à cette réduction de la complexité du traitement. La FFT est utilisée à travers une fenêtre d'observation glissante [66] pour améliorer l'affichage d'une analyse de fréquence. Malgré sa popularité, la transformée de Fourier rapide (FFT) ne convient pas à l'étude des signaux non stationnaires par définition. Ces signaux entrent en collision beaucoup plus fréquemment en dehors des signaux fixes [67].

Sur un signal stationnaire, le premier exemple est une somme de deux sinusoïdes de fréquence (50 et 150 Hertz) de même amplitude (FFT voir figure III.10.a) et d'amplitude différente (FFT voir figure III.10.b) . On peut voir que les deux signaux sont identiques en raies spectrales et bien sûr les amplitudes diffèrent.



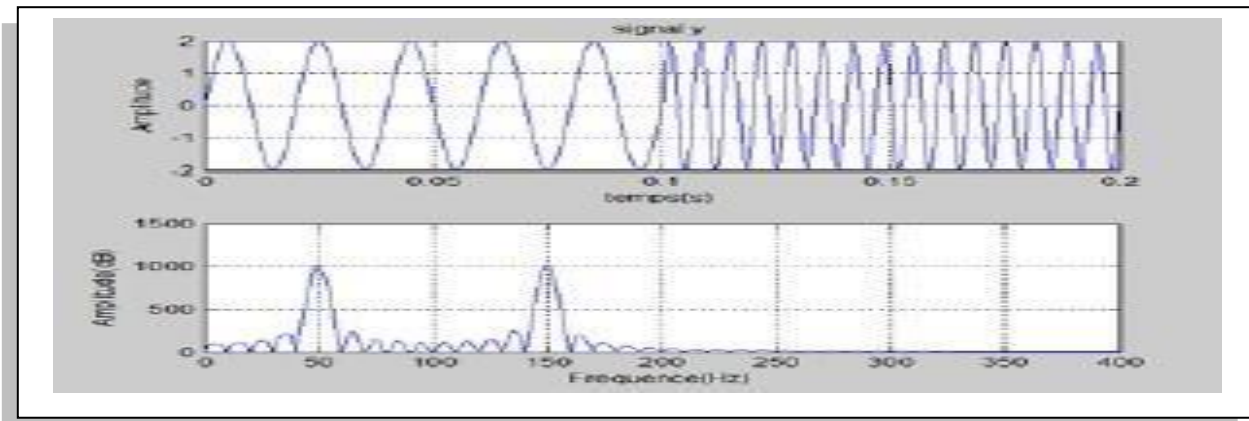
(a) : mêmes amplitudes.



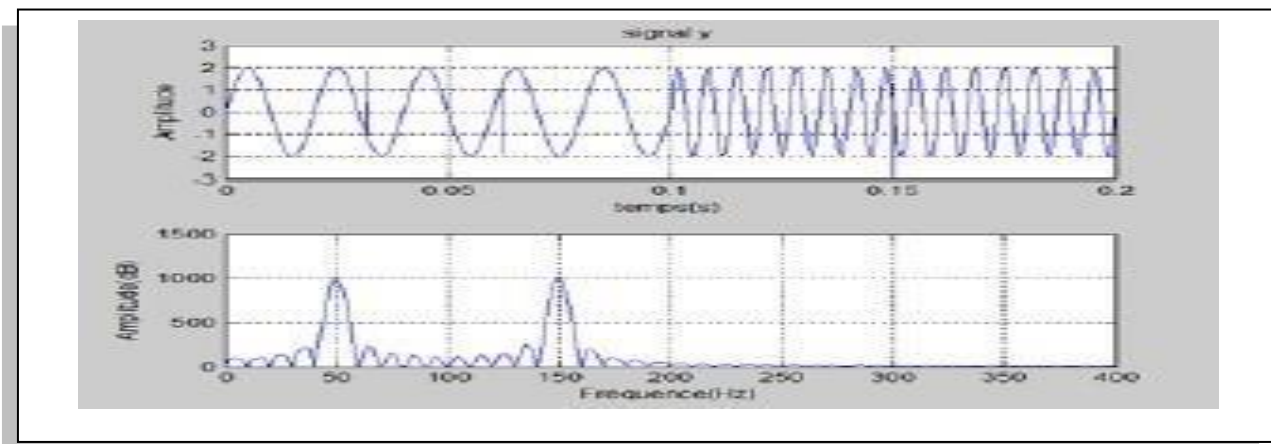
(b) : amplitudes différentes

**Figure III.10.** Représentation temporelle et fréquentielle somme de deux sinusoides.

Dans le deuxième exemple de signal non stationnaire, le taux de fréquence change dans le temps, passant d'une sinusoïde de 50 Hz à une sinusoïde de 150 Hz avec la même amplitude. Il convient de souligner que l'analyse de fréquence n'est pas en mesure de fournir des informations sur la localisation temporelle de la transition du régime du signal (voir figure) (III.11). On le constate aussi que dans la figure (III.11.b) une impulsion est ajoutée par rapport à la figure (III.11.a), mais sans aucun impact sur la FFT [66].



(a) : succession de deux sinusoïdes.



(b) : succession de deux sinusoïdes +impulsions

**Figure III.11.** Perte de localisation temporelle.

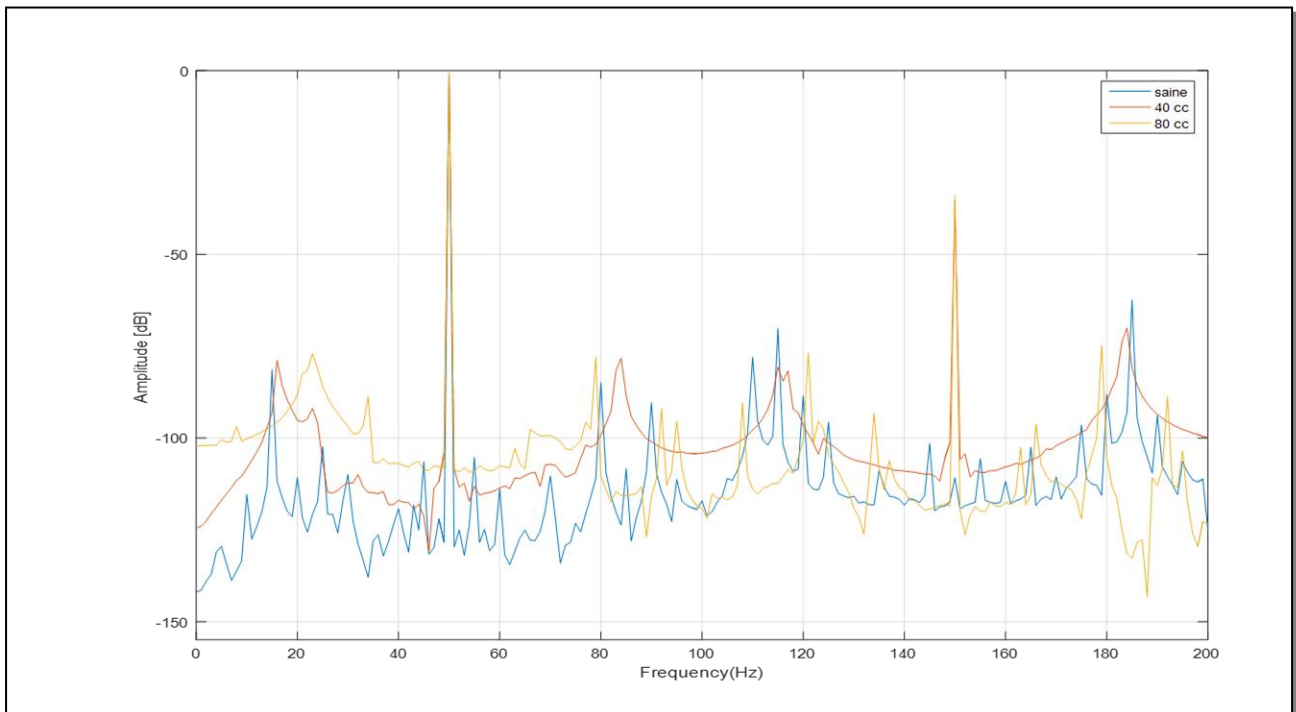
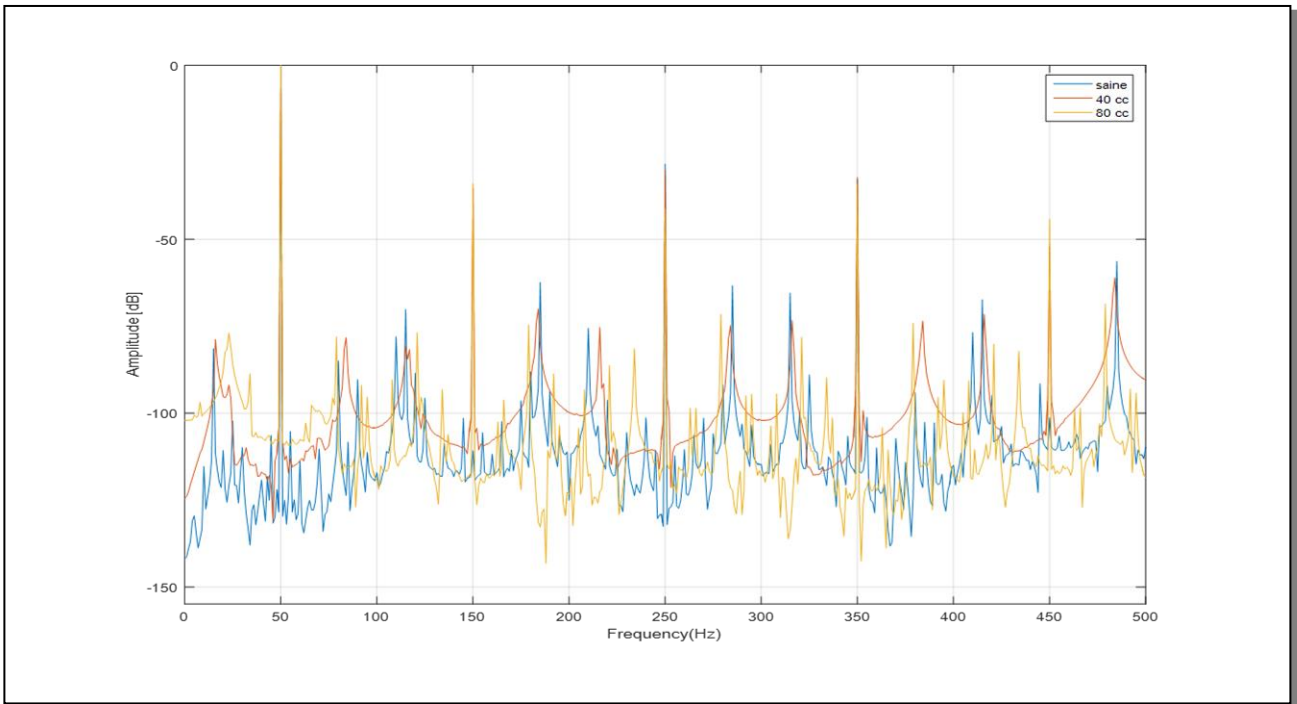
### III-4 Diagnostic par l'analyse fréquentielles

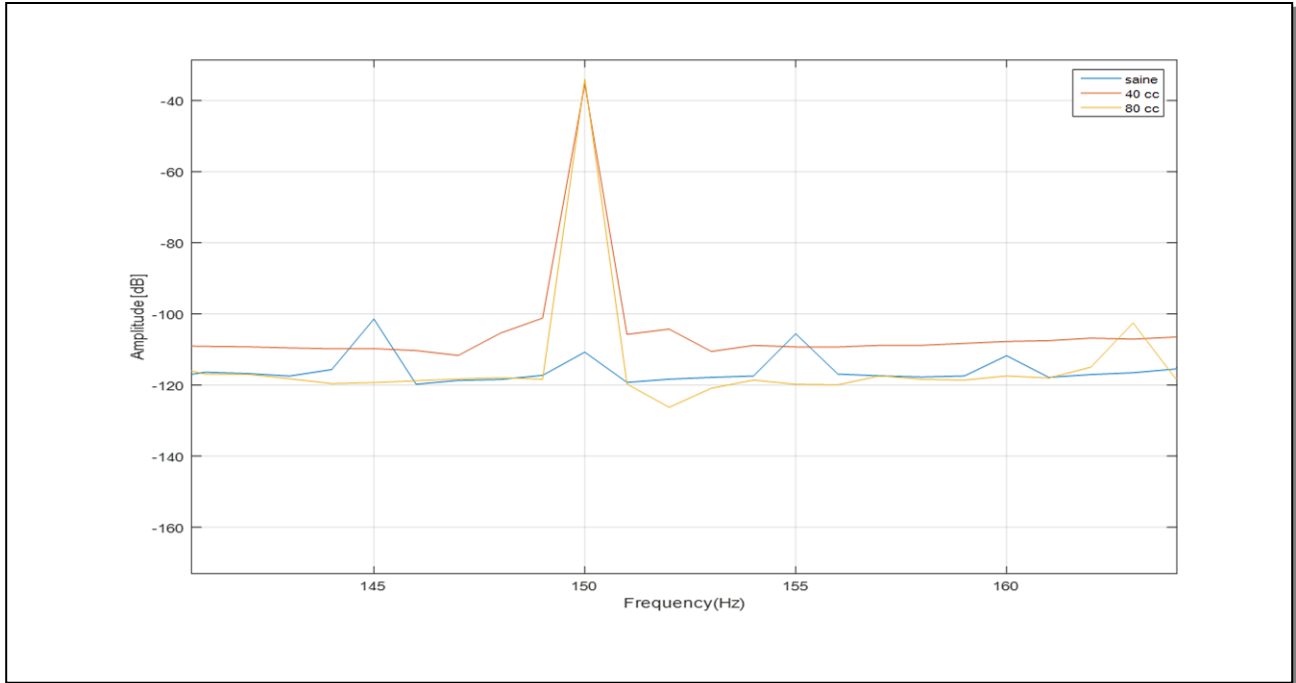
Le court-circuit d'une ou de plusieurs spires de son bobinage d'un stator est le défaut statorique le plus courant; il se manifeste par la formation d'harmoniques dans le spectre du courant statorique à des fréquences données., l'asymétrie inhérente du moteur se traduirait par l'apparition de troisièmes composants harmoniques dans le courant d'alimentation. Une augmentation significative du courant de ligne  $+3f$  composants dans des conditions de défaut a été validée à la fois numériquement et expérimentalement en [68].

Dans la section suivante nous avons surveiller l'évolution de la 3<sup>ème</sup> harmonique dans le courant et de flux fuite.

III-4-1 Analyse des courants statoriques

Les figures ci-après représentent les spectres des courants statoriques dans la machine saine avec défaut de court-circuit entre spire au stator.



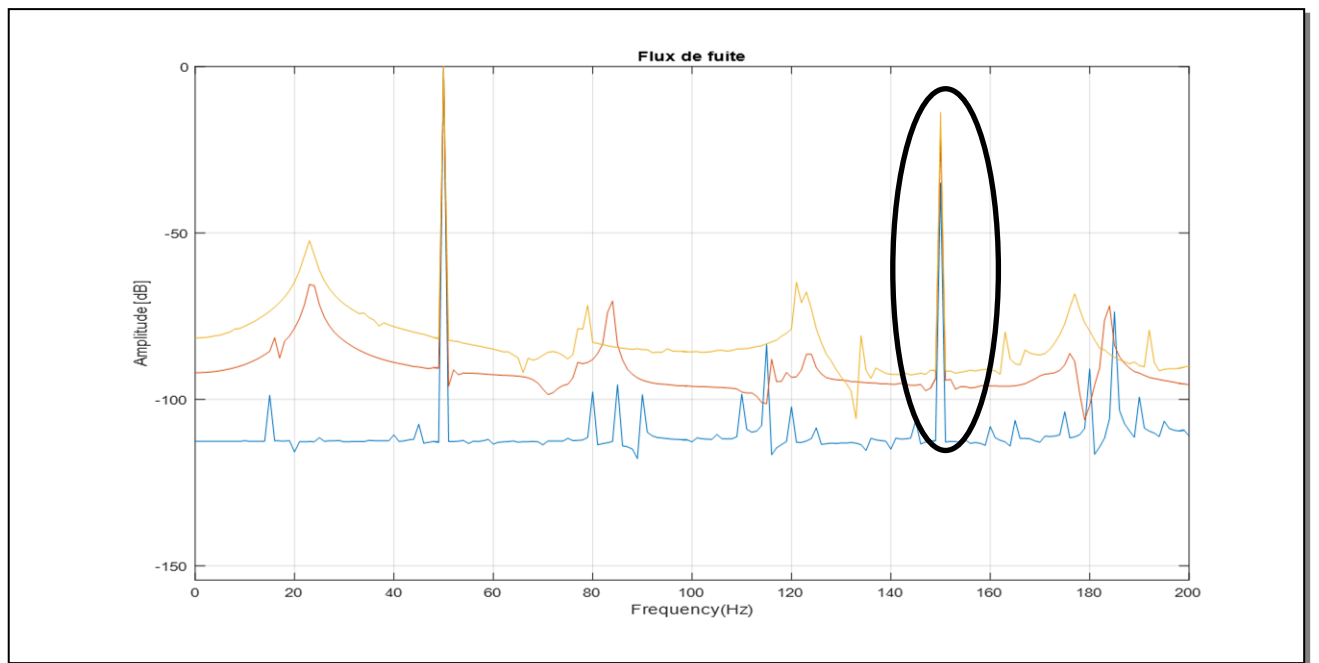
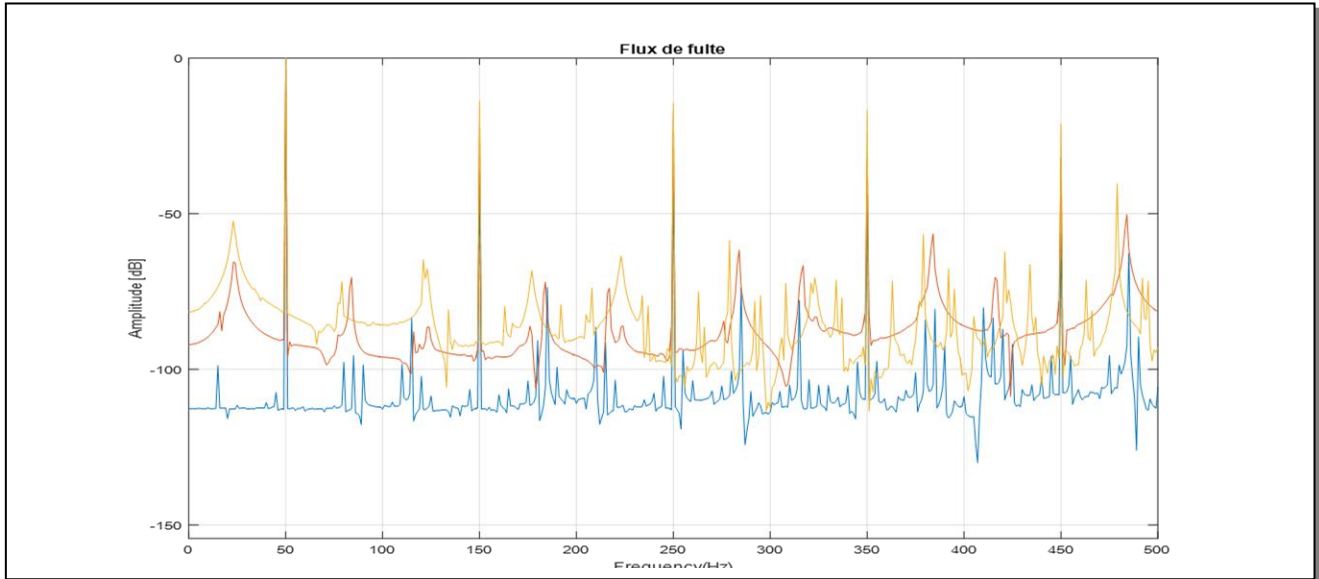


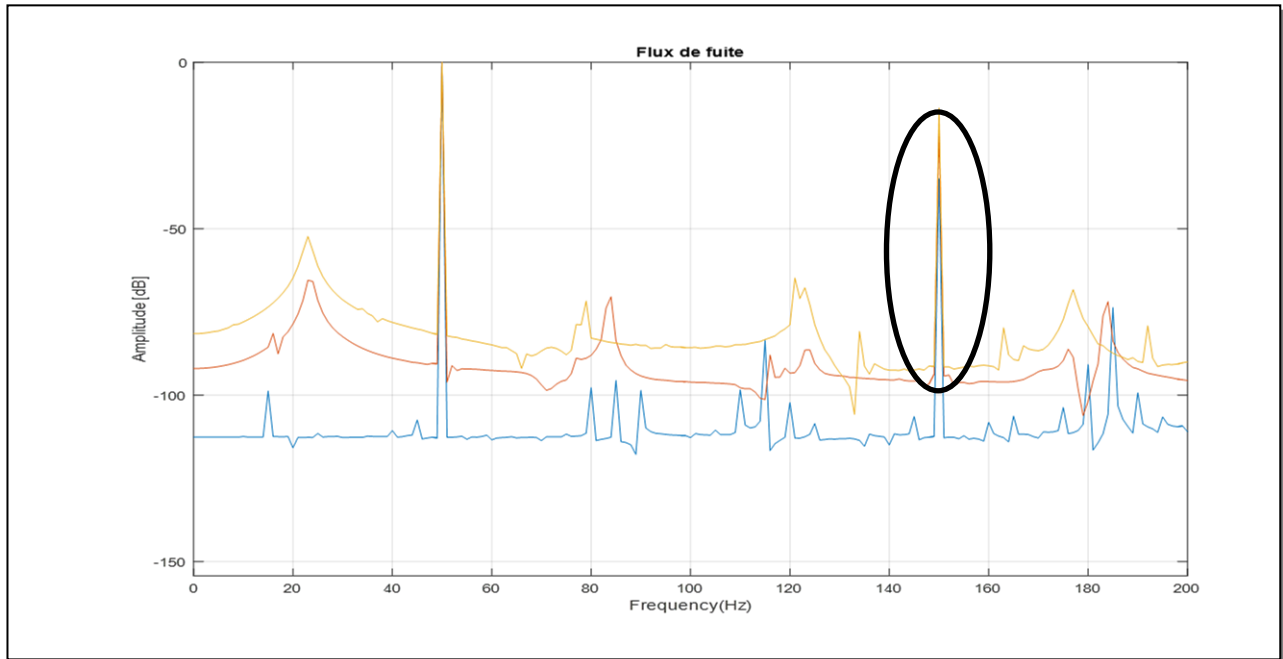
**Fig. III.12:** le spectre de courant statorique de 0 Hz à 500 Hz et 0 Hz à 200 Hz pour une machine avec défaut court-circuit.

Dans le cas d'un court-circuit entre les spires, l'amplitude de la 3eme harmonique ( 150 Hz) augmente par rapport au cas sain. La valeur de cette composante est -43dB dans l'état sain et augmente a -35 dB et -34 dB dans le cas de 40 et 80 spires en court-circuit respectivement

### III-4-2-Analyse de flux de fuite

Les figures suivantes représentent les spectres de flux de fuite dans les machines saines avec défaut court-circuit.





**Fig. III.13:** le spectre de flux de fuite de 0 Hz à 500 Hz et 0 Hz à 200 Hz pour une machine avec défaut court-circuit

Dans le cas de flux de fuite , l'amplitude de la 3<sup>ème</sup> harmonique ( 150 Hz) augmente aussi en fonction de défaut . La valeur de cette composante est -35dB dans le l'état saine et augmente a -20.5 dB et -13.7 dB dans le cas de 40 et 80 spires en court-circuit respectivement.

### III-5 Conclusion

L'analyse présentée par la méthode des éléments finis montre qu'il s'agit d'une méthode efficace et économique pour étudier l'influence des défauts sur le comportement des machines asynchrones et a permis de comprendre les conséquences locales des défauts dans la machine .

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode non invasive basée sur l'analyse de flux à l'extérieur de la machine. Les résultats obtenus pour les défauts de court-circuit entre les spires infectent l'amplitude de la 3<sup>ème</sup> harmonique dans le flux de fuite. Les résultats sont comparés avec celles de courant .

## **Conclusion générale**

La machine asynchrone est la composante la plus importante dans les systèmes électriques, et sa surveillance et son diagnostic ont fait et font toujours l'objet de plusieurs études.

Notre recherche est axée sur l'utilisation de modèles à éléments finis pour détecter les défauts dans une machine asynchrone.

Nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone triphasée à cage, ainsi que ses origines. Puis, nous avons présenté un état de l'art des différentes techniques de surveillance des machines asynchrones. Nous avons mis au point un modèle à éléments finis à l'aide du logiciel 2D Flux pour simuler de nombreux défauts qui peuvent se produire pendant le fonctionnement normal, contrairement à la plupart des études analytiques diagnostiques.

Ces modèles ont 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 la détection des défauts dans la machine asynchrone en utilisant deux méthodes, l'une basée sur l'analyse spectrale du courant statorique et la deuxième basée sur l'analyse de champ de fuite, nous avons constaté l'efficacité des deux méthodes dans le domaine de diagnostic. En termes de perspectives, nous pouvons affirmer que cet effort est le début de :

- Explorer les effets d'autres défauts possibles sur le modèle ;
- Validation expérimentale
- Diagnostic machine.

- [1] **K. Nour, T. Arezki** "Technique de diagnostic des défauts statorique d'un moteur asynchrone", Diplôme de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2017.
- [2] **LARIBI Souad**, « Contribution à la Commande et Diagnostic des Défauts Statoriques et Rotoriques de la Machine Asynchrone à Cage d'écureuil », Thèse de Doctorat, Université de des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 27 Avril 2016.
- [3] **BABAA Fatima**, « Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone: "Application au diagnostic des défauts statoriques" », Thèse de Doctorat, Université Constantine 1, 11 Juin 2014.
- [4] **A. Ouanas, A. Medoued, S. Haddad, M. Mordjaoui, D. Sayad.** " Automatic and Online Detection of Rotor Fault State Int. Journal of Renewable Energy Development (IJRED). Vol.7. n°:1. 2018,pp.43-52. <https://doi.org/10.14710/ijred.7.1.43-52>
- [5] **M. Ammar**, "Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques :applications aux moteurs asynchrones" Thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, 2012.
- [6] **R.Bousseksou**, «Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic», Université Mentouri Constantine, année 2007.
- [7]: **M. E. H. Benbouzid, G. B. Kliman.** « What Stator Current Processing Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis?»,IEEE, Transaction on Energy Conversion,VOL18n°2,pp. 238-244, Jun 2003
- [8] **A. Hamadou, A.Nessissen** «Modélisation numérique d'un moteurasynchrone à cage d'écureuil», Université Djilali Bou naama Khemis Miliana, année 2015.
- [9] **L.Kerszenbaum et C. F. Landy**, "The existence of large inter bar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and en-ring faults" IEEE Transactions onPower Apparatus Systems, Vol. PAS-103, n°7, pp.1854- 1862, July 1984.
- [10] **Y.Laamari**, "Diagnostic des défaillances dans les systems électromécaniques" Thèse de doctorat, Université badjimo khtar annaba, 2016.
- [11] **MAGHRAOUI Abde lwahab et DEBOUCHA Abde lhakim**, « Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage», UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA, année 2006
- [12] : **BELHAMDI Saad**« Priseen Compte D'un Défaut Rotorique Dans la Commande d'un Moteur Asynchrone »Thèse de Magister , Université Mohamed Khider Biskra, Soutenue 2005
- [13] **Ondel,O.** (2006).Diagnostic par reconnaissance des forms : applicationun ensemble convertisseur-machine asynchrone (doctora l dissertation, ecole centrale de lyon).
- [14] **Bouguerne.**'(2009).diagnostic automatique des defaults des moteurs asynchrones,mémoire de magister,université mentouri,constantine,algérie
- [15] **Belhamdi Saad**, " Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [16] **HalemNoura**, " Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis",Thèse de Doctorat,Université Mohamed Khider– Biskra, 2015
- [17] **BabecheYacine, Bouras Samir**, "Diagnostic des machines électriques par la méthode des éléments

finis", Diplôme de Master, Université MohamedBoudiaf– M'sila, 2018

[18] **O. V. Thorsen, M. Dalva**, "A survey of fault on induction motors in offshore oilindustry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries" IEEEET transactions on Industry Applications, Vol.31,no.5,pp.1186-1196,September1995

[19] **Saidji Rebiha, Abdel louad Samia**, « L'Impact des Défauts de l'Onduleur Triphasé sur le Diagnostic du Moteur Asynchrone », mémoire de master, Université des Sciences et de la Technologied'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie, Juin 2017.

[20] : **HUBERT Razik**« Le Contenu Spectral Du Courant Absorbé Par La Machine Asynchrone En Cas de Défaillance »Faculté des Sciences , Nancy, CEDEX , juin 2002.

[21]**M. S. Naït-Saïd, M. E. H. Benbouzid et A. Benchaib**, " Detection of broken bars in induction motors using an exten de kalman filter forrotor resistances en sales estimation"IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.15,no 1,pp.66-70,Mars2000

[22] **Bessous Noureddine**, " Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones :Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation",Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider–Biskra,2017

[23] **R.Casimir**. Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes.Thèsedoctorat. Ecole centrale de Lyon. décembre 2003

[24] **B. A. T. Iamamura, Y. Le Menach, A. Tounzi, N. Sadowski, E. Guillo**, « Study of Static and Dynamic Eccentricities of a Synchronous Generator Using 3-D FEM»,IEEEET rans actions on Magnetics , Vol. 46, No. 8, 2010,pp.3516-3519.

[25] **Jawad Faiz, Bashir Mahdi Ebrahimi, Bilal Akin, Hamid A. Toliyat**, « Finite-ElementTransient Analysis of Induction Motors Under Mixed Eccentricity Fault», IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 01, 2008, pp.66-74

[26] **A. H. Bonnett**. Root cause ac motor failure analysis with a focus on shaft failures. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36(5) :1435-1448, September/ October2000.

[27] **J. Povinelli, F. Bangura**, Diagnostics of Eccentricities and Bar/End-Ring Connector Breakages in Polyphase Induction Motors Through a Combination of Time-SeriesData Mining and Time-Stepping Coupled FE–State-Space Techniques. IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 39, NO. 4, JULY/AUGUST 2003

[28] **A. Ibrahim**" Contribution au diagnostic de machines électromécaniques "Thèse de doctorat, université de saint Etienne Mars 2009.

[29] **N .Bessous** " Contribution au diagnostic des machines asynchrones " .Mémoire de magister En Electrotechnique. Université Mentouri Constantine 2007.

[30] **MAHDAOUI Rafik**, « Contribution à la surveillance dynamique des systèmes de production évolutifs par les systèmes Neuro-FlousTemporale », Thèse Doctorat, Université Batna, 22 Décembre 2013.

[31] **KHODJA Djatal Eddine**, «Elaboration d'un Système Intelligent de Surveillance et de

Diagnostic Automatique en Temps Réel des Défaillances des Moteurs à Induction », Thèse de Doctorat, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, 19 Avril 2007.

[32] **D. Thailly**, "Etude du champ de dispersion des machines à courant alternatif : Application au diagnostic," Thèse de doctorat, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE), Université d'Artois, Béthune, France, 2007

[33] **F. Filippetti, G. Franceschini, and C. Tassoni**, "Neural networks aided on-line diagnostics of induction motor rotor faults," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, pp. 892-899, July/August 1995.

[34] **A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G. A. Capolino**, "Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics* vol. 55, pp. 4109-4126, December 2008.

[35] **G. Salles, F. Filippetti, C. Tassoni, G. Crellet, and G. Franceschini**, "Monitoring of induction motor load by neural network techniques," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, pp. 762-768, 2000.

[36] **M. A. Awadallah and M. M. Morcos**, "Application of AI tools in fault diagnosis of electrical machines and drives-an overview," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, pp. 245-251, 2003.

[37] **S. B. Makarand, J. K. Zafar, M. S. Hiralal, and L. S. Ram**, "Adaptive Neural Fuzzy Inference System for the Detection of Inter-Turn Insulation and Bearing Wear Faults in Induction Motor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp. 250-258, 2007

[38] **B. Vaseghi**, "Contribution à l'Etude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut", Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009.

[39] **A. Ceban**, "Méthode Globale de Diagnostic des Machines Electriques", Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement, France, 2012.

[40] **T. Boumegoura**, "Recherche de Signature Electromagnétique des Défauts dans une Machine Asynchrone et Synthèse d'Observateur en vue du Diagnostic", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 2001.

[41] **C. Concari, G. Franceschini, C. Tassoni**, "Differential Diagnosis Based on Multivariable Monitoring to Assess Induction Machine Rotor Conditions", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, N°12, PP. 4156-4166, 2008.

[42] **M. Drif, A. J. M. Cardoso**, "Stator Fault Diagnostics in Squirrel Cage Three-Phase Induction Motor Drives Using the Instantaneous Active and Reactive Power Signature Analyses", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 10, N°2, PP. 1348-1360, 2014.

[43] **W. T. Thomson, M. Fenger**, "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults", *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 7, N°4, PP. 26-34, 2001

[44] **N. Feki, G. Clerc, P. H. Velez**, "Gear and Motor Fault Modeling and Detection Based on Motor Current Analysis", *Electr Power Syst Res*, Vol. 95, PP. 28-37, 2013.

[45] **M. Blödt, P. Granjon, B. Raison, G. Rostaing**, "Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring", *IEEE Transactions on Industry Electronics*, Vol. 55, N°4, PP. 1813-1822, 2008.

- [46] **K. N. Gyftakis, D. V. Spyropoulos, J. C. Kappatou, E. D. Mitronikas**, "A Novel Approach for Broken Bar Fault Diagnosis in Induction Motors Through Torque Monitoring", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 28, N°2, PP. 267-277, 2013.
- [47] **V. Hegde, G. S. Maruthi**, "Experimental Investigation on Detection of Air Gap Eccentricity in Induction Motors by Current and Vibration Signature Analysis Using Non-Invasive Sensors", *Energy Procedia*, Vol. 14, PP. 1047-1052, 2012
- [48] **A. Ceban, R. Pusca, R. Romary**, "Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, N°5, PP. 2082-2093, 2012.
- [49] **A. Yazidi, H. Henao, G. A. Capolino, M. Artioli, F. Filippetti, D. Casadei**, "Flux Signature Analysis: an Alternative Method for the Fault Diagnosis of Induction Machines", *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, PP. 1-6, 2005.
- [50] **D. Toumi** «Détection des Défauts Rotoriques dans la Machine Asynchrone (Cassure des Barres et excentricité) », Mémoire de Magister, USTO Oran 2002.
- [51] **P.J. Tavner, B.G. Gaydon and D.M.Ward** «Monitoring Generators and Large Motors », *IEEE Proceedings*, Vol 133, Pt, B N°4 May 1986.
- [52] **P. Alger** «The Induction Machine Their Behavior and Uses », Oxford press 1970.
- [53] **Boudouia Khedidja** «Diagnostic Automatique des Défauts dans les Moteurs à Induction par la Méthode Nouro-Floue » Mémoire de Magister, USTO Oran 2002.
- [54] **Bessous Noureddine**, "Contribution au diagnostic des machines asynchrones", Magister en électrotechnique, option: machines électriques, Université de Mentouri Constantine, Algérie, 2007.
- [55] **Penman, J., Sedding, H.G., Lloyd, B.A., Fink, W.T.** «Detection and Location of Inter-turn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors », *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1994, pp. 652-658.
- [56] **Lebaroud Abdesselam**, " Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2006.
- [57] **Toliyat H. A. and Lipo T. A.**, « Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults », *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 10, n°2, June 1995, pp. 241-247.
- [58] **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", p3, 2005.
- [59] **Jerance N., Rostaing G., Rognon J.-P., Foggia A.**, « Induction machine modeling by reluctance network for fault diagnostic », *Proc. of electrimecs'02*, Montréal, Canada, 18th - 21st August, 2002.
- [60] **Derrhi M.**, Modélisation de la machine asynchrone par réseaux de perméances, validation par le diagnostic, Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne, 2000.
- [61] **M.Bouharkat** « étude de l'évolution des courant rotorique d'un machine asynchrone à cage en régime dynamique » these docteur d'état Es-science université de Batna 15/02/2006.

[62]**G.Rakotonirina** « modélisation thermique des moteurs asynchrones à cage par la méthode des éléments finis » doctorat en génie électrique (ph.d) université du québec à trois-rivières 30 AVRIL 2001

[63]**M.Belatel** «Contribution a la conception assistée par ordinateur des machines électriques»these magister,université Mentouri,Constantine,2004.

[64] **C. Golovanov**, " Développement De Formulations Eléments Finis 3D En Potentiel Vecteur Magnétique: Application A La Simulation De Dispositifs Electromagnétiques En Mouvement, " Thèse Pour Obtenir Le Grade De Docteur, Institut National Polytechnique De Grenoble - INPG, 1997. France.

[65]**A.Zorig**«Identification des MAS en Vudeleurs diagnostic » mémoire de magister , Université de Sétif , année2010

[66] **BAZI Smail**, " Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur", Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, 2016.

[67] **Kerroum Badreddine**, " Etude et Diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction",Diplôme de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.

[68] **G. M. Joksimovic', and J. Penman** "The Detection of Inter-Turn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 47, Issue 5, Oct. 2000, pp. 1078 – 1084, 2000.

## Résumé

Depuis de nombreuses années, le diagnostic des défauts dans les machines électriques a fait l'objet de nombreux travaux de recherche scientifique. L'objectif de ce projet est de proposer une méthode de diagnostic fiable et moins coûteuse pour le diagnostic des défauts de court-circuit entre spire au stator de la machine asynchrone. En première temps nous avons construit un modèle à éléments finis qui permet de simuler les défauts dans la machine asynchrone à l'aide du logiciel Flux2D®. Par la suite, Deux techniques de diagnostic ont été utilisées pour détecter les signatures de défaut danscette étude (analyse spectrale des courants statorique, l'analyse de champs de fuite). Les résultats obtenus indiquent clairement que les signatures de ces défauts apparaitre dans lespectre du courant statorique et la tension induite de champs de fuite.

**Mots clés :** Machine Asynchrone, Eléments finis, Flux 2D, champs de fuite, Diagnostic.

## ملخص

لسنوات عديدة ، كان تشخيص الأعطال في الآلات الكهربائية موضوعاً للعديد من أعمال البحث العلمي. الهدف من هذا المشروع هو اقتراح طريقة تشخيص موثوقة وأقل تكلفة لتشخيص أعطال ماس كهربائي بين لفات الجزء الثابت للآلة غير بعد Flux2D® المتزامنة. أولاً ، قمنا ببناء نموذج عنصر محدود يحاكي الأعطال في الآلة غير المتزامنة باستخدام برنامج ذلك ، تم استخدام طريقتين تشخيصيتين لكشف توقيعات الخطأ في هذه الدراسة (التحليل الطيفي للتيارات الثابتة ، تحليل مجالات التسرب). تشير النتائج التي تم الحصول عليها بوضوح إلى أن بصمات هذه العيوب تظهر في طيف تيار الجزء الثابت والجهود المستحث لمجالات التسرب.

**كلمات البحث:** آلة غير متزامنة، عناصر محدودة، تدفق ثنائي الأبعاد، حقول مبعثرة، تشخيص

## Abstract

For many years, the diagnosis of faults in electrical machines has been the subject of numerous scientific research works. The objective of this project is to propose a reliable and less expensive diagnostic method for the diagnosis of short-circuit faults between the turns of the stator of the asynchronous machine. First, we built a finite element model that simulates faults in the asynchronous machine using the Flux2D® software. Subsequently, two diagnostic techniques were used to detect fault signatures in this study (spectral analysis of stator currents, analysis of leakage fields). The results obtained clearly indicate that the signatures of these defects appear in the spectrum of the stator current and the induced voltage of leakage fields.

**Key words:** Asynchronous machine, Finite elements, 2D flow, dispersion fields, Diagnosis