

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
En vue de l'obtention du diplôme de :
MASTER
En Génie Électrique

Option : **Maintenance industrielle**

Présenté par :
Sahraoui ZOUBEYR & Belaiba CHOUAIB

Thème

DIAGNOSTIQUE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE
DOUBLE ÉTOILE PAR L'ANALYSE DE FLUX DE FUITE

Devant le jury composé de :

Ghadban ISMAIL	Pr	Président
Zorig Assam	MCA	Encadreur
Hamouda Noureddine	MCA	Co-Encadreur
Belhaouchet Khaled	MCA	eximinateur
Ali Djeriou	Pr	Represent-incupateur
Lamara Haouari	ing	Socio- économique

Remerciements

Nous remercions en premier lieu notre Dieu de Nous donner La santé et la patience pour avoir Terminer ce travail. Nous tenons évidemment à débiter ces remerciements notre encadreur Monsieur ZORIG Assam qui a bien voulu nous encadrer et pour ses conseils précieux, sa disponibilité et sa patience. Nous remercions également tous les membres de jury d'avoir accepté de jugé ce travail. Nous tenons également à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

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

Mon père

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

Ma mère

. A mon sœurs et mes frères.

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

Aux leaders de M. Zorig Assam.

Et pour tous mes amis.

ZOUBEYR Sahraoui

Dédicaces

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

Mon père

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

Ma mère

.A mon sœurs et mes frères.

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

Aux leaders de M. Zorig Assam.

Et pour tous mes amis.

CHOUAIB Belaiba

Table des matières

Liste des figures	7
Introduction générale	12
Chapitre 1 : État de l'art.....	13
I.1 Introduction	14
I.2. La machine asynchrone.....	14
I.2.1 Éléments de constitution de la machine asynchrone	14
I.2.2 Stator.....	15
I.2.3 Rotor	15
I.2.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :.....	16
I.3 Applications des Machines Multiphasées	17
I.4 Les avantages et les inconvénients de la MASDE :	17
I.4.1 Les avantages des machines multiphasées :.....	17
I.4.2 Inconvénients des machines multiphasées.....	18
I-5-4 Différents défauts dans la machine asynchrone à cage :.....	18
I.6 Présentation des différentes méthodes de diagnostic :.....	21
I.6.1 Diagnostic par l'analyse des courants statoriques :	21
I.6.2 Diagnostic par l'analyse vibratoire de la machine :	21
I.6.3 Diagnostic par l'analyse de la signature de flux magnétique	22
I.6.4 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique :	25
I.6.5 Diagnostic par analyse de la température : La Thermographie	25
I.7 Conclusion :.....	26
Chapitre 2 : Modélisation et simulation D'une MASDE.....	27
II.1 Introduction :.....	28
II.2 Méthode des éléments finis.....	28
II.2.1 Modèle employé.....	29
II.2.1.1 Mode magnétostatique.....	29
II.3 Logiciel de résolution	30
II.3.1 Logiciel FLUX-2D	31
II.4 Module pré-processeur	31
II.4.1 Module processeur	31

II.4.2 Module post-processeur de Flux-2D(PostPro_2D).....	31
II.5 Application à la simulation de la MASDE	33
II.6 Matériaux	36
II.6.1 Matériaux conducteurs	36
II.6.2 Matériaux magnétiques	36
II.7 Couplage avec les équations de circuit	37
II.8 Résultats de simulation	38
II.8.1 Fonctionnement à vide	38
II.8.2 Fonctionnement en charge.....	40
II.9 Conclusion	43
Chapitre 3 : diagnostic de la MASDE par l'analyse de flux de fuite	44
III 1/ Introduction.....	45
III 2/Influence d'une rupture de barre dans une machine asynchrone double étoile	45
III 3/ Simulation des défauts de cassure des barres rotoriques.....	46
III 4/Diagnostic de la MASDS par l'analyse fréquentielle(FFT) de courant.....	52
III 4.1/ Diagnostic de la MASDE par l'analyse fréquentielle de flux de fuite	53
III 5/Conclusion	55
CONCLUSION GENERALE	57
Bibliographie.....	58

Liste des figures

Figure I.1 Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	14
Figure I.2 : Stator d'une MASDS. [4].....	15
Figure I.3. Rotor à cage d'écureuil.....	16
Figure I.4: Rotor bobinée.....	16
Figure I.5 : Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases	17
Figure.I.7. Court-circuit entre spire [14]	18
Figure I.8. Ruptures de barres.....	19
FigureI.9 Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit [16].....	19
Figure I.10: Les défauts d'excentricité [18]	20
Figure I.11: Architecture d'un roulement rigide à billes.	21
Figure I.12: Mesures vibratoires sur la machine asynchrone. [19]	22
Figure.I.13. Distribution des lignes de champs de fuite dans la MASDE	23
Figure.14 exemples de capteur de flux d fuite utilise pour le diagnostic des machines asynchrone. [43].....	24
Figure.I.15. Exemples de capteur de flux d'entrefer utilise pour le diagnostic des machines asynchrone [29].....	24
Fig.I.16. image infrarouge du moteur en régime permanent (a) moteur sain (b) moteur avec défaut de roulement.[30].....	26
Figure II 1 : Schéma des différents modules du logiciel Flux	32
Figure II.2 : Dimension des encoches, a) l'encoche statorique, b) l'encoche rotorique	33
Figure II 3 : Bobinages statoriques de l'étoile 1 de la MASDE	34
Figure II.4 représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine	35
Figure II.5 représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.	35
Figure II.6. L'induction magnétique	36
Figure II 7: Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN	37
Figure II 8 : Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.	37
Figure II.9: Circuit équivalent de la cage d'écureuil.	38
Figure II.10 : Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique à vide à $t = 0.65s$	38
Figure II.11: Courants statoriques à vide.....	39
Figure II 12 : Couple électromagnétique	39
Figure II.13: Vitesse de rotation.....	39
Figure II.14: Courants rotoriques à vide.....	40
Figure II 15: Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique en charge à $t = 0.75 s$.41	
Figure II 16 : courant de phase statorique étoile 1 dans la machine a saine	41

Figure II 17 : courant de phase statorique étoile 2 dans la machine a saine	41
Figure II.18 : courant rotoriques de MASDE, dans la machine saine	42
Figure II 19 : Vitesse rotoriques de MASDE, dans la machine saine	42
Figure II 20 : couple rotoriques de MASDE, dans la machine saine	42
Figure II 21: Courants rotoriques en charge dans les barres 1,2.....5.	43
Figure III 1 : Répartition des lignes équiflux :(a) une machine saine (b) une seule barre cassée, (c) trois barres cassées.	46
Figure III 2 : Répartition des lignes équiflux :	46
(a)une machine sain (b) une seule barre cassées, (c) trois barre cassées	46
Figure III 3 : Répartition de l'induction dans le circuit magnétique :	47
(a)une machine sain (b) une seule barre cassées, (c) trois barre cassées	47
Figure III 5 : courant de phase, dans la machine avec un une barre cassée.....	48
Figure III 6 : courant de phase dans la machine avec une 3 barre cassée	49
Figure III 7 : Courant de barre ((a)une machine saine (b) une barre cassée, (c) trois barres cassées.....	49
Figure III.8: tension induite délivré par le capteur bobiné dans le cas.....	50
(a) machine saine (b) une barre cassées, (c) trois barre cassées.....	50
Figure III 9 : le couple de la machine avec une (a)une machine sain (b) une seule barre cassées, (c) trois barre cassées	51
Le Figure III 10 : La vitesse de la machine avec une (a)une machine saine (b) une seule barre cassée, (c) trois barres cassées	52
Figure III 11 : Spectres du courant statorique- machine saine.....	52
Figure III 12 : Spectres du courant statorique- machine avec une barres cassée.....	53

LISTE DE TABLEAUX

Tableau II 1 : Caractéristiques statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.....33

Tableau II 2 : B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN [15] **Error! Bookmark not defined.**

Liste des Notations et Symboles

MASDE: Machine Asynchrone Double Etoile.

MAS : Machine asynchrone.

CEMC : la Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.

CEMC-A : la Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés analytique.

RNM : la méthode des réseaux de permanées.

CIE : le Modèle à circuits internes équivalents.

MEF : Méthode des éléments Finis.

FFT : (Fast Fourier Transform).

BC : barre cassée.

exc : excentricité.

CC : court-circuit

g : glissement.

n: Nombre déphasé.

α : Angle électrique de décalage

Ω_m : Vitesse mécanique du rotor.

ω_s : Pulsation électriques tatorique.

ω_r : Pulsation électrique rotorique.

p : Nombre de paire de pole.

Cr : Couple résistant.

Cem : Couple électromagnétique.

J : Moment d'inertie.

ϕ_m : Flux magnétisant

$H^{\vec{}}$: Vecteur champ magnétique [A /m]

$B^{\vec{}}$: Vecteur induction magnétique [T]

$H^{\vec{}}$: Champ magnétique (A/m)

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

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

$B_r^{\vec{}}$: Induction rémanente des aimants (T)

J : Densité de courant totale (A/m²)

μ : Perméabilité magnétique (H/m)

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

Introduction générale

Introduction générale

Les machines électriques sont largement utilisées dans l'industrie pour convertir l'énergie électrique en mouvement. Parmi elles, la machine asynchrone (ou à induction) est très répandue grâce à sa robustesse, sa simplicité d'entretien et son coût relativement bas. Un type particulier de cette machine, appelé machine asynchrone à double étoile, est de plus en plus utilisé car il offre de meilleures performances et une répartition plus équilibrée du courant électrique.

Cependant, comme toute machine électrique, cette machine peut subir des défauts au fil du temps, tels que des courts-circuits dans les enroulements ou des problèmes mécaniques internes. Si ces défauts ne sont pas détectés au stade initial, ils peuvent provoquer des arrêts de production ou endommager gravement la machine.

Pour éviter cela, des méthodes modernes de surveillance et de diagnostic ont été développées. L'une de ces méthodes est l'analyse du flux de fuite magnétique. Elle consiste à observer les champs magnétiques qui s'échappent de la machine pendant son fonctionnement. Toute variation anormale dans ces flux peut indiquer la présence d'un défaut interne.

Ce mémoire a pour objectif de présenter comment cette méthode peut être utilisée pour diagnostiquer les défauts d'une machine asynchrone à double étoile. Nous commencerons par expliquer simplement le fonctionnement de cette machine, puis nous introduirons la notion de flux de fuite, avant de montrer comment son analyse permet de détecter les anomalies avant qu'elles ne deviennent critiques.

Le chapitre I présente un état de l'art sur la surveillance de des machines asynchrone. Ainsi que une présentation succincte de la constitution de la machine à étudier. Les différents Défauts qui peuvent apparaître dans une machine asynchrone.

Le chapitre II est consacré à la modélisation de la machine asynchrone double étoile par la méthode des éléments finis sous logicielle Flux 2D, ensuite nous avons présenté la simulation de la machine saine.

Le chapitre III nous présentons les résultats de la simulation de diagnostic des défauts des barres cassées de rotor de MASDS. Ces défauts sont diagnostiqués par l'analyse de flux de fuite et comparé avec à celles de courant statorique.

Chapitre 1 : État de l'art

I.1 Introduction

Tout d'abord, nous détaillons la composition et le mécanisme de fonctionnement de la machine asynchrone à double stator (MASDE), ainsi que ses utilisations, points forts et points faibles. Ensuite, nous aborderons les divers types de défaillances susceptibles de se produire dans cette machine. Pour finir, nous résumons succinctement les méthodes fondamentales fréquemment appliquées pour identifier les anomalies dans cet appareil. [1]

I.2. La machine asynchrone

La machine asynchrone (MAS) est sans conteste la machine la plus répandue dans le secteur industriel. Cette popularité grandissante est expliquée par divers atouts comme sa force de masse, sa solidité, sa simplicité d'application, son prix modique... Etc. L'évolution des convertisseurs de fréquence, qui autorisent une large variation de la fréquence de rotation, est effectivement intégrée dans la conception de nombreux processus industriels. Ces procédés combinent les convertisseurs statiques et les machines électriques (comme l'entraînement électrique, le laminage, le levage, le pompage, etc.). [2]

Malgré la solidité de la machine asynchrone, elle peut connaître, comme tous les autres équipements électriques, des pannes de nature électrique ou mécanique. Par conséquent, compte tenu des répercussions significatives et onéreuses potentielles qu'un dysfonctionnement peut entraîner dans les processus industriels, l'identification des défauts a suscité un intérêt croissant au cours des deux dernières décennies. [2]

I.2.1 Éléments de constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone à double stator se compose d'un stator fixe et d'un rotor tournant. À l'inverse des machines asynchrones triphasées, elle comporte plus de trois phases au sein du stator. De plus, contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements du stator sont connectés à un réseau d'alimentation, tandis que les enroulements rotatifs sont reliés entre eux. [1]

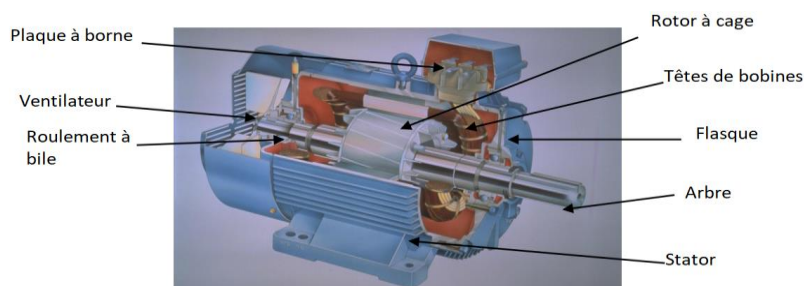


Figure I.1 Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

I.2.2 Stator

Dans la MASDS Le stator est constitué de plusieurs bobines réparties dans des encoches, formant six enroulements distincts, qui sont organisés en deux ensembles de trois phases nommés.

Chaque étoile est décalée l'une par rapport à l'autre selon un angle électrique (α) et est alimentée par un réseau triphasé équilibré. Lorsqu'ils sont alimentés par des systèmes de tension ou de courant triphasés, ils ont pour but de générer un champ magnétique tournant. [3]

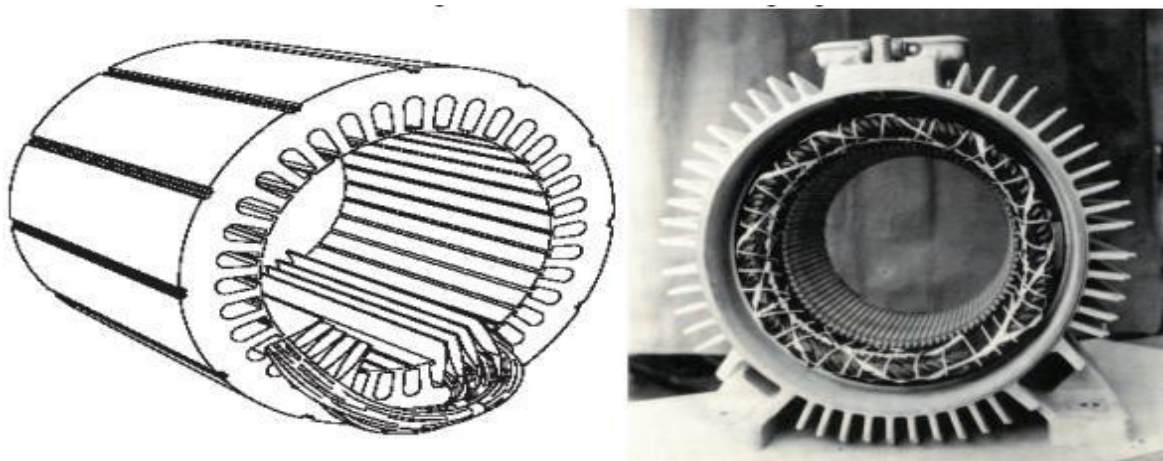


Figure I.2 : Stator d'une MASDS. [4]

I.2.3 Rotor

On distingue deux principaux types de rotors dans les machines asynchrones : le rotor bobiné, comportant trois enroulements similaires à ceux du stator, couplés en étoile et court-circuités, et le rotor en cage d'écureuil, qui est le plus couramment utilisé dans l'industrie. Ce dernier est constitué de barres conductrices insérées dans les encoches du rotor, reliées aux extrémités par des anneaux de court-circuit, permettant la circulation du courant entre les barres. Cette structure simple, robuste et économique explique son emploi fréquent tant dans les applications industrielles que dans les études de diagnostic des machines asynchrones. [4]

I.2.3.1 Le rotor à cage d'écureuil :

Le rotor en cage d'écureuil est la partie tournante d'une machine asynchrone. Il est constitué de barres conductrices reliées par deux anneaux aux extrémités, formant une cage. Le courant y est induit par le champ tournant du stator, sans alimentation directe. Il est simple, robuste et peu coûteux. [4]

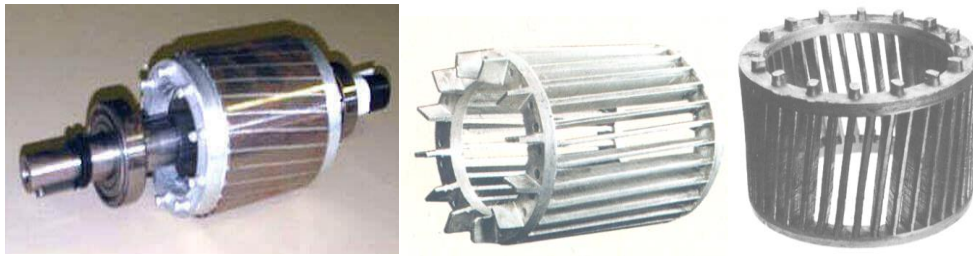


Figure I.3. Rotor à cage d'écureuil.

I.2.3.2 Rotor bobiné :

Le rotor bobiné est un rotor de machine asynchrone avec des enroulements connectés à des bagues collectrices. Il permet un meilleur contrôle du démarrage et du couple, mais il est plus complexe et nécessite plus d'entretien que le rotor en cage. [4]



Figure I.4: Rotor bobinée

I.2.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :

La machine asynchrone à double étoile sera utilisée comme exemple de son fonctionnement. Dans les deux stators (étoile 1 alimentée par des courants triphasés et étoile 2 alimentée par les mêmes courants triphasés mais décalés par un angle), les courants du stator forment un champ magnétique tournant. La fréquence des courants du stator de f_s détermine la fréquence de rotation de ce champ ; ainsi, sa vitesse de rotation est liée à la fréquence de l'alimentation électrique ; la vitesse ω_s de ce champ de rotation est connue sous le nom de vitesse de synchronisation. Voici ce qu'il dit [7] :

$$\omega_s = \frac{f_s}{p} \text{ [Rad/s]}$$

Ces deux Champs tournants produisent par les deux enroulements statoriques vont induire des courants dans les conducteurs du rotor. Ainsi générant des forces électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse ω_r inférieure à Celle du synchronisme ($\omega_r < \omega_s$), ainsi les effets de l'induction statoriques sur les courants induits

rétorques se manifestent par L'élaboration d'un couple de force électromagnétique sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit.

La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est dite vitesse relative : [6]

$$g = \omega_s - \omega_r$$

On dira alors que ces deux champs glissent par rapport au rotor et on définit ce Glissement par le rapport : [6]

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

I.3 Applications des Machines Multiphasées

Dans les applications à haute puissance, les machines multiphasées sont beaucoup plus Courantes. Les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les usines de compression, les cimenteries et d'autres applications similaires en font partie [8]. Une autre application est l'utilisation de machines multiphasées dans les systèmes de production d'énergie éolienne : la machine à double étoile génère de l'énergie à l'aide de deux systèmes triphasés reliés à un transformateur qui convertit les tensions des six phases en tensions réseau (Figure I.5) .[9]

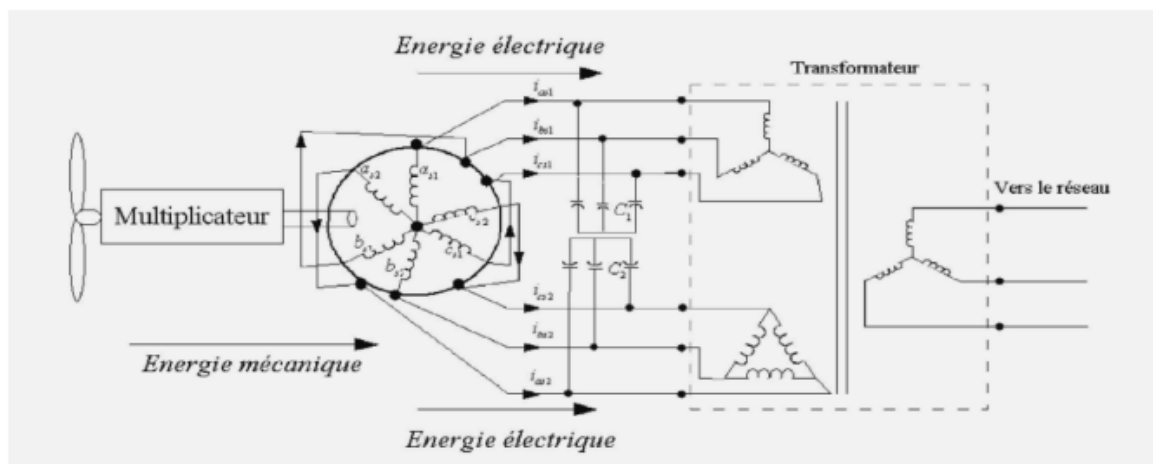


Figure I.5 : Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases

I.4 Les avantages et les inconvénients de la MASDE :

I.4.1 Les avantages des machines multiphasées :

Avantage de la MASDE La MASDE présente plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées [10] [8]

- Segmentation de puissance
- Amélioration de la fiabilité
- Amélioration du facteur de puissance

- Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques.

I.4.2 Inconvénients des machines multiphasées

- L'augmentation du coût de l'ensemble convertisseur- machine : Le nombre de semi-conducteurs augmente avec le nombre de phases élevées [8].
- L'inconvénient majeur des machines double étoile est l'apparition de courants harmoniques de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension [8].
- la structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux présente un inconvénient, ce qui complique sa commande.
- L'augmentation du nombre de semi-conducteurs complique évidemment le système de commande. Il est nécessaire de développer des techniques de commande rapprochées pour les convertisseurs statiques spécifiés et adaptées pour les machines multiphasées de type 2, puisque les méthodes élaborées pour les systèmes triphasés ne peuvent pas directement être appliquées aux systèmes à un nombre de phases impaires tel que (5 phases, 7 phases, etc.) [8]

I-5-4 Différents défauts dans la machine asynchrone à cage :

I-5-4-1 Défaillances au stator

Bien que l'usure des isolateurs soit accélérée par la vibration des conducteurs d'entaille et le frottement provoqué par les exigences rigoureuses de la machine, la principale cause de détérioration reste un échauffement anormal des bobinages. Des dépôts de poussière et d'humidité s'accumulent sur les appareils fermés entre les ailettes externes et sur les appareils ouverts au niveau des têtes de bobine, qui opèrent dans des conditions défavorables, ce qui détériore l'isolation électrique et provoque des courts-circuits dans les conducteurs. [11]



Figure.I.7. Court-circuit entre spire [14]

I-5-4-2 Défauts rotoriques

Une évaluation du spectre permanent du courant statorique donne des indications sur les anomalies du rotor, comme la rupture de barre, les anneaux de court-circuit ou l'excentricité du rotor.[8]

I-5-4-2-1 cassure de la barre

L'un des défauts les plus fréquents sur un rotor est la présence d'une cassure ou rupture de barre. La dégradation des barres diminue la valeur moyenne du couple électromagnétique tout en amplifiant l'amplitude des oscillations, ce qui induit des vibrations mécaniques. Ces dernières génèrent à leur tour des fluctuations dans la vitesse de rotation, conduisant ainsi à un fonctionnement irrégulier de la machine.



Figure I.8. Ruptures de barres

I-5-4-2-2 ruptures de d'anneaux

Le défaut de rupture de portion d'anneau se produit aussi fréquemment que la rupture de barre car les sections d'anneaux de court-circuit transportent plus de courant que les barres rotoriques[16]. Ainsi, un dimensionnement incorrect des anneaux, une dégradation des conditions d'opération (température, humidité, etc.) ou une surcharge en couple et en courant peuvent entraîner leur rupture [13].

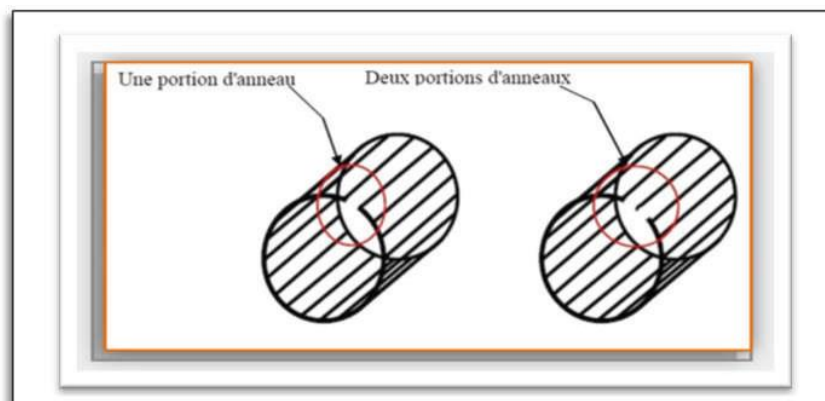


Figure I.9 Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit [16].

I-5-4-2-3 excentricité statique et dynamique

La variation de la densité de flux entrefer dépend de la longueur de l'entrefer. Les enroulements du stator subissent des impacts électriques, perceptibles dans le spectre des courants. En général, on distingue trois types d'excentricité. [17]

- L'excentricité statique, où le rotor est déplacé par rapport au centre de l'alésage du stator tout en continuant à tourner autour de son axe. - L'excentricité dynamique, où le rotor se trouve au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe. - L'excentricité mixte, qui combine les deux situations précédentes. On peut illustrer les formes d'excentricité statique et dynamique comme suit :

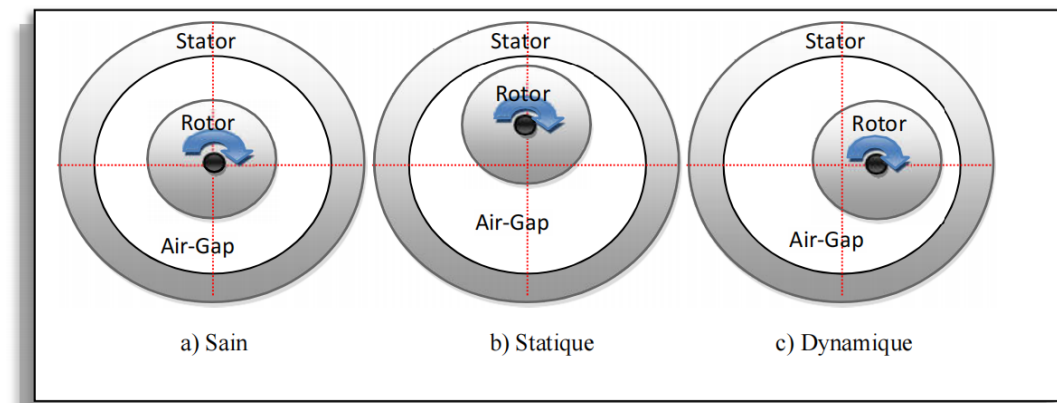


Figure I.10: Les défauts d'excentricité [18]

I-5-4-3-1 Défauts roulements

Le roulement est un élément essentiel qui assure une liaison mobile entre deux éléments d'un mécanisme par rapport à l'autre. Elle a pour rôle de faciliter la rotation relative de ces composants sous contrainte, avec exactitude et un minimum d'adhérence.

Environ 40% à 50% des défaillances observées dans les machines asynchrones sont attribuables aux roulements. Le roulement comprend les éléments suivants :

- Deux bagues en acier, désignés comme bague intérieure et extérieure, sont dotés de pistes de roulement (surfaces sur lesquelles les éléments roulants se déplacent).
- Des billes, rouleaux ou corps roulants en acier favorisent le déplacement des deux bagues avec un niveau de friction minimal.

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.

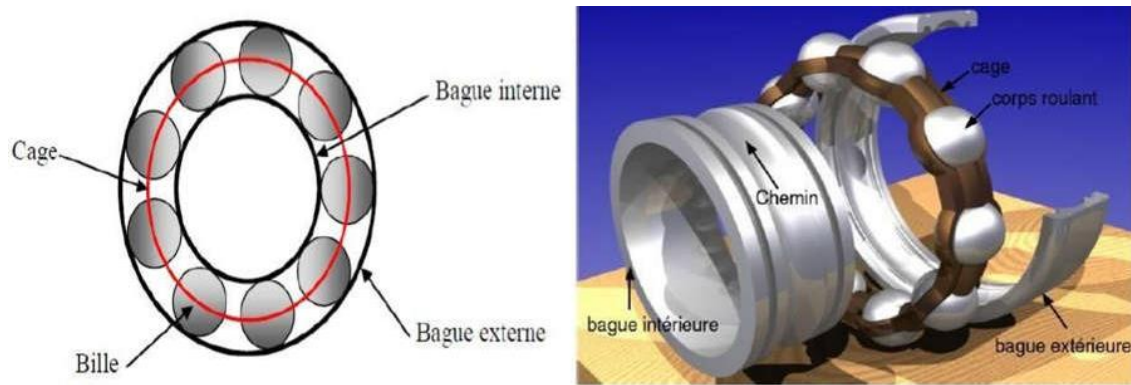


Figure I.11: Architecture d'un roulement rigide à billes.

I.6 Présentation des différentes méthodes de diagnostic :

I.6.1 Diagnostic par l'analyse des courants statoriques :

L'approche la plus courante consiste à examiner les courants du stator dans le domaine de fréquence, car le spectre obtenu révèle des détails sur la plupart des problèmes électriques et magnétiques susceptibles de survenir dans une machine asynchrone. [20] Il est déjà établi que l'évaluation de l'amplitude des éléments de fréquence spécifiques dans le spectre présent nous fournit des renseignements sur la condition de la cage du rotor. Spectre de courant du stator lors du fonctionnement de la machine avec un rotor en bon état et un rotor défectueux, comme par exemple si une barre est cassée. L'élargissement de ces éléments a considérablement augmenté, signalant l'existence d'une anomalie dans la cage à écureuils. [20]

I.6.2 Diagnostic par l'analyse vibratoire de la machine :

Il est possible d'utiliser des accéléromètres placés sur les roulements dans les orientations verticale, axiale et radiale pour réaliser des analyses de vibrations sur la machine asynchrone. Les vibrations de la machine, en complément des courants, fournissent des renseignements sur presque toutes les anomalies mécaniques fréquemment rencontrées. Comme nous l'avons constaté, les éléments de fréquence qui détectent les problèmes listés sont liés à la fréquence de rotation du rotor. De ce fait, leurs signatures ne présentent pas des différences suffisamment marquées. L'emploi de ceux-ci engendrerait des problèmes de discrimination parmi diverses sortes de défauts. En revanche, les vibrations de l'appareil semblent être des indicateurs clés pour identifier un problème ou un déséquilibre dans le rotor. [19]

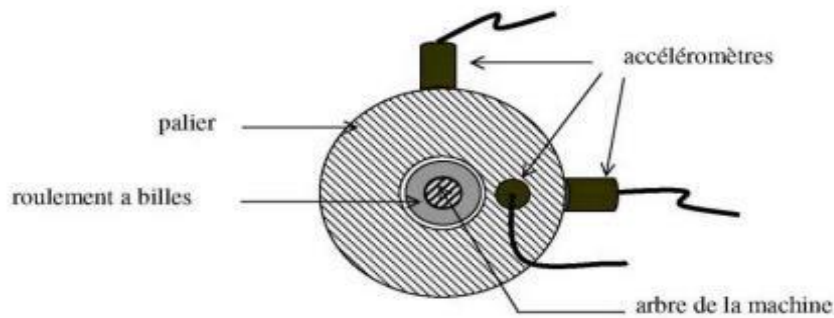


Figure I.12: Mesures vibratoires sur la machine asynchrone. [19]

I.6.3 Diagnostic par l'analyse de la signature de flux magnétique

L'étude du flux magnétique est une méthode de contrôle qui attire l'attention de nombreux chercheurs et producteurs de machines électriques. Le progrès significatif, la diminution des coûts et de la taille des capteurs nécessaires, l'élaboration de méthodes sophistiquées de traitement du signal dédiées à l'examen des données en continu, et d'autres bénéfices inhérents associés à cette technologie sont des éléments cruciaux qui ont favorisé l'émergence de cette méthode.

L'étude du champ magnétique a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs dans ce domaine, ainsi que de certains fabricants de moteurs. Ces derniers ont choisi d'intégrer des capteurs magnétiques à leurs équipements afin d'offrir des fonctionnalités d'autodiagnostic intégrées. [21-22] .

Cette tendance manifeste est en partie attribuée aux multiples bénéfices et atouts fournis par l'analyse des données de flux comparativement aux autres méthodes traditionnelles. Pour expliquer ces bénéfices, cette orientation manifeste est partiellement attribuable aux multiples avantages et aux atouts procurés par l'analyse des données de flux comparativement à d'autres méthodes conventionnelles. Pour comprendre ces bénéfices, il est essentiel de mentionner que les méthodes fondées sur les flux magnétiques se divisent généralement en deux catégories majeures : celles qui reposent sur l'examen des flux de fuite (l'étude du flux magnétique qui s'échappe hors de la machine), et celles axées sur l'étude du flux d'entrefer (qui correspond à l'évaluation du flux interne existant dans l'entrefer)..

I.6.3.1. Analyse de Flux magnétique de fuite

Le flux de fuite dans la machine asynchrone est généré par divers composants de l'appareil. La distribution des lignes de champ est illustrée dans la Figure I.22.

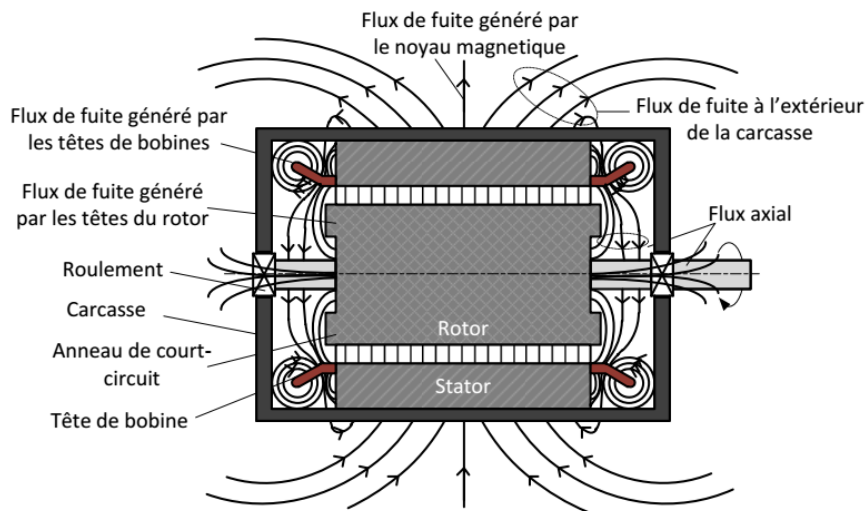


Figure.I.13. Distribution des lignes de champs de fuite dans la MASDE

L'utilisation de capteurs de flux externes pour surveiller les fuites présente des bénéfices tels que :

- 1) son efficacité et sa fiabilité démontrées dans les situations où les méthodes traditionnelles donnent des indications erronées (ex : conduits d'air axiaux du rotor, anisotropie magnétique du rotor, oscillations de charge à basse fréquence, etc.) [30],
- 2) Sa nature non invasive et sa simplicité d'application. [26].
- 3) Il est nécessaire d'avoir des capteurs à un coût très réduit. [27]
- 4) Adaptabilité et aisance de mise en place des capteurs. [28].

Bien que l'analyse des flux de fuite présente de nombreux atouts, comme toute méthode, elle comporte ses propres restrictions. Quelques projets de recherche en cours cherchent à fournir des remèdes fiables à certains de ces désavantages qui, d'après les écrits existants, sont les suivants :

- 1) L'élaboration d'un modèle du champ magnétique se révèle ardue, car elle est fortement liée au comportement électromagnétique de la culasse du stator et du boîtier du moteur, qui jouent un rôle significatif dans l'effet de blindage.[29].
- 2) influence de la position du capteur sur les résultats [30-31].

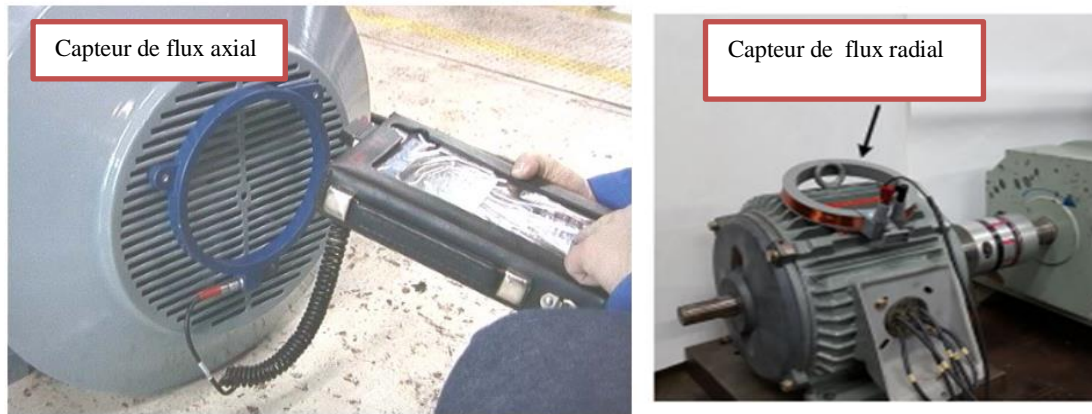


Figure.14 exemples de capteur de flux d fuite utilise pour le diagnostic des machines asynchrone. [43]

I.6.3.2. Analyse de la signature de flux magnétique d’entrefer

La figure I.15 illustre un modèle de suivi du flux d'entrefer à l'aide de bobines de recherche. Un capteur de bobine de recherche est un dispositif qui évalue les changements dans le flux magnétique. Généralement, plusieurs fils isolés sont enroulés conjointement pour créer une bobine d'une poignée de tours, qui est positionnée autour de la dent du stator du moteur afin d'évaluer la fluctuation du flux magnétique principal. La production d'une telle bobine de recherche correspond à la tension générée en raison du changement de flux. Le moteur à induction présenté dans la figure I.15 est équipé de bobines d'investigation enroulées autour de chaque dent du stator. Les bobines sont installées dans les fentes du stator et fixées par les cales du stator.

Ce choix d'instrumentation n'exige aucun espace additionnel dans l'entrefer. Toutefois, le principal inconvénient de la méthode d'analyse du flux d'entrefer est la nécessité de mettre en place un capteur à l'intérieur de l'appareil. Ce qui la rend une approche intrusive ; On présente la détection de divers défauts dans la machine asynchrone en se basant sur l'observation du flux d'entrefer. [39-42] .

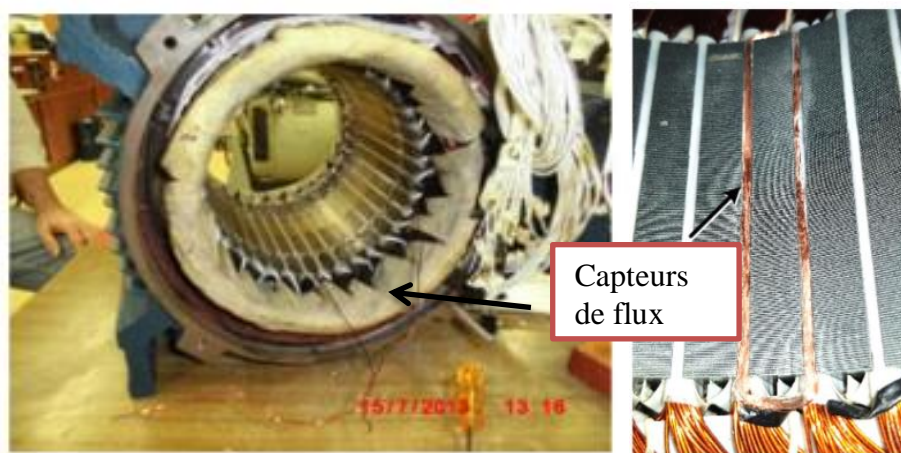


Figure.I.15. Exemples de capteur de flux d’entrefer utilise pour le diagnostic des machines asynchrone [29].

I.6.4 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique :

L'analyse harmonique peut révéler certains vices mécaniques dans le spectre du couple électromagnétique mesuré, qui découle d'une interaction entre le flux et le courant. Il est possible de calculer ce couple en se basant sur deux ou trois courants du stator, ou bien à l'aide d'un modèle physique de la machine.

L'emploi de ce signal pour identifier les anomalies de charge pourrait représenter une alternative pratique. En effet, les modifications de couple de charge entraîneront des altérations du flux et de l'intensité du courant dans la machine. Ainsi, la torsion de l'arbre génère des harmoniques dans les spectres du couple. Les harmoniques des dents du rotor sont générées par l'asymétrie électrique du rotor, ce qui entraîne une modification de l'espace aérien. On peut donc détecter le problème en analysant les fréquences de l'entaille dans les données estimées.[35]

I.6.5 Diagnostic par analyse de la température : La Thermographie

Les détecteurs infrarouges ont la capacité de repérer les zones chaudes où les températures excèdent des limites prédéterminées. Dans ce but, une inspection exhaustive de l'équipement électrique, y compris du moteur asynchrone, est réalisée. Les éléments du système électrique sont exposés à une charge standard, étant donné que les systèmes analysés sont en service. En fait, ils pourraient donner l'impression d'émettre différemment sur l'image infrarouge, selon leur conception, leur fonctionnement, leur charge et leur composition. L'opérateur différencie les températures de fonctionnement habituelles des anomalies. La conception, le poids et le matériau sont tous des éléments essentiels à prendre en compte. L'opérateur fait la différenciation entre les températures de fonctionnement habituelles et les anomalies. Puisque les anomalies sont spatialement restreintes, la modification des caractéristiques de l'objet (émissivité, atmosphère, etc.) facilite un calcul direct de la température maximale enregistrée et potentiellement de la surchauffe. Si le système ne tourne pas à son plein régime, un calcul additionnel peut être réalisé pour évaluer la diminution de la surchauffe lors d'un fonctionnement standard. On associe la surchauffe à la dynamique de dégradation et donc aux niveaux d'urgence en l'évaluant. Cette décision est essentielle puisqu'elle offre une localisation en temps réel, facilitant ainsi la détection des anomalies dans le traitement.

Le défaut est consigné sur une image infrarouge ainsi qu'une photographie visible. Suite à l'analyse du spectrogramme obtenu, une identification pourrait être envisageable où les zones et p d'autres vérifications thermographiques seraient mises en évidence.[35]

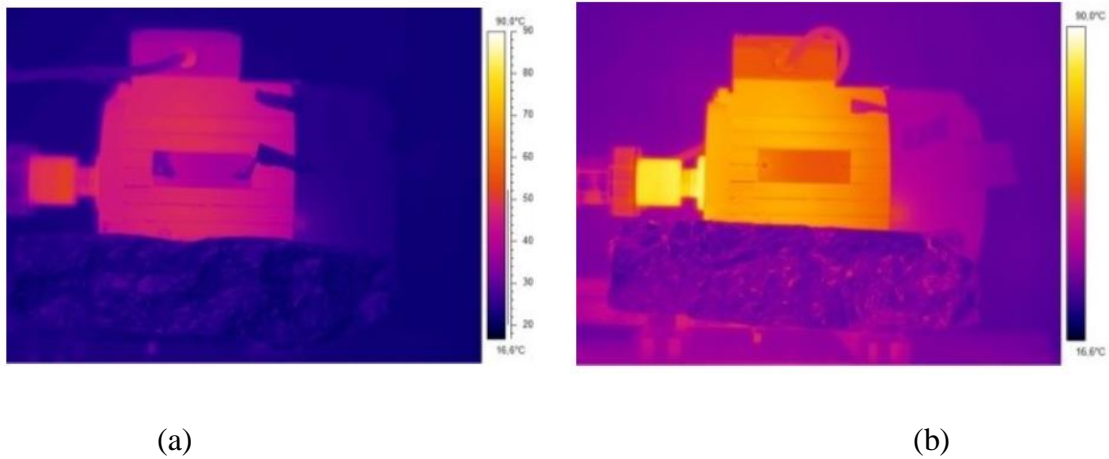


Fig.I.16. image infrarouge du moteur en régime permanent (a) moteur sain (b) moteur avec défaut de roulement.[30]

I.7 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'examiner certaines défaillances potentielles affectant les machines asynchrones, en mettant particulièrement l'accent sur la structure et les composants de la machine asynchrone à double étoile, ainsi qu'en évoquant brièvement la machine synchrone. Une attention particulière a été portée aux méthodes de diagnostic préventif, visant à détecter les défauts avant qu'ils n'entraînent des dysfonctionnements majeurs.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de la machine asynchrone à double étoile en s'appuyant sur la méthode des éléments finis (FEM), afin de mieux analyser son comportement électromagnétique et de valider les approches de diagnostic précédemment Présentées.

Chapitre 2 : Modélisation et simulation D'une MASDE

II.1 Introduction :

La méthode des éléments finis (FEM) est aujourd'hui largement considérée comme un outil numérique efficace, fiable et fréquemment employé. Elle donne aux designers la possibilité de s'attaquer à des problèmes complexes qui sont difficilement gérables par des méthodes analytiques conventionnelles. [35].

De nombreuses recherches ont été consacrées à la modélisation et à la simulation de la machine asynchrone à double étoile, couvrant divers aspects tels que la conception, le contrôle et le diagnostic. La variété des buts recherchés a entraîné la création de nombreuses méthodes de modélisation et l'emploi d'instruments de simulation diversifiés, adaptés à chaque champ d'étude.

Toutefois, ces instruments sont généralement élaborés pour une topologie ou un type de machine clairement déterminé. Il serait donc judicieux d'avoir un outil qui soit à la fois facile à utiliser, généraliste et adaptable, pouvant faire office de plateforme expérimentale pour divers appareils électriques [38].

Dans ce chapitre, nous focalisons nos efforts sur l'élaboration d'un modèle qui intègre la topologie, les dimensions et la composition de la machine asynchrone double étoile, en recourant à la technique des éléments finis.

II.2 Méthode des éléments finis

Au lieu de s'appuyer sur le modèle équivalent fondé sur les équations électriques de la machine, cette approche se base sur la résolution numérique des équations de Maxwell [29]. Elle autorise une modélisation extrêmement détaillée, prenant en compte la géométrie authentique de l'appareil, les phénomènes de saturation des matériaux magnétiques, les effets des harmoniques spatiales ainsi que l'effet de peau dans les barres du rotor — sous réserve que le problème soit correctement formulé (géométrie, lois physiques, couplage avec les équations de circuit, etc.) et que la méthode de résolution sélectionnée soit pertinente (magnétostatique, magnétodynamique ou transitoire).

Sur le plan pratique, cette méthode offre une souplesse considérable : il est en fait très simple de changer les conditions d'opération de la machine (fréquence, flux magnétisant, etc.) simplement en ajustant les configurations dans le programme de calcul, ce qui en fait un instrument particulièrement flexible et performant. [39].

Pour les machines électriques, le champ électromagnétique est déterminé par les équations de Maxwell, enrichies par les relations constitutives spécifiques au matériau examiné. Ces équations expriment en particulier

- les relations de couplage électromagnétique :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.1})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

- Les relations de la conservation des flux :

$$\text{div}\vec{E} = \rho \quad (\text{II.3})$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{II.4})$$

- La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques

$$\vec{B} = \mu\vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.5})$$

-La relation de la loi d'Ohm

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (\text{II.6})$$

II.2.1 Modèle employé

En fonction des résultats attendus et du temps de simulation disponible, on peut recourir à trois méthodes de résolution. [38] :

II.2.1.1 Mode magnétostatique

Cette méthode ne peut être employée que pour reproduire un instant spécifique d'un régime principalement à vide (c'est-à-dire sans courants induits dans le rotor), car elle exige de connaître les courants qui circulent dans chacune des barres du rotor. Il est surtout utilisé pour calculer l'inductance magnétique du moteur. Dans ce mode, on considère que les sources sont indépendantes du facteur temps.

Le terme $\partial\vec{B}/\partial t = 0$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent:

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.7})$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{II.8})$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.9})$$

la condition (2.8) permet de définir une fonction en vecteur potentiel A telle que:

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}\vec{A} \quad (\text{II.10})$$

Pour que A soit totalement défini, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition $\text{div}(\vec{A}) = 0$ appelée jauge de Coulomb. Qui vérifiée automatiquement l'unicité de la solution.

Par la substitution de (2.10) et (2.9) dans (2.7) nous obtenons l'équation électromagnétique magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

$$\overrightarrow{rot} (V. \overrightarrow{rot} \vec{A}) = \vec{j} + \overrightarrow{rot} (V. \overrightarrow{B}_r) \quad (\text{II.11})$$

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

II.2.1.2 Mode magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux appareils dont les sources de courant ou de tension fluctuent avec le temps.

Le terme $\partial B/\partial t$ n'est pas nul.

Cette méthode de simulation, qui repose sur l'hypothèse d'une densité de courant sinusoïdale et sur un fonctionnement en régime établi, fournit des valeurs précises du courant efficace. On peut l'utiliser pour étudier le schéma équivalent de la machine.

Le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{rot} (V. \overrightarrow{rot} \vec{A}) + \vec{j} \omega \sigma \vec{A} = \vec{j} \quad (\text{II.12})$$

II.2.1.3 Mode magnétique transitoire :

Il s'agit du modèle le plus exhaustif, capable de reproduire avec précision la rotation du moteur. Comme l'alimentation est en courant transitoire dans cette situation, toutes les équations caractéristiques précédemment citées doivent être résolues de façon progressive, en tenant compte de l'évolution dans le temps.

Donc le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{rot} (V. \overrightarrow{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \overrightarrow{rot} \overrightarrow{B}_r + \sigma \overrightarrow{grad} V = 0 \quad (\text{II.13})$$

II.3 Logiciel de résolution

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution [39] :

- Introduction des données géométriques et des propriétés physiques.
- maillage.
- résolution.
- exploitation des résultats. Sont séquentiellement exécutées

Il doit être possible d'accéder à ces modules de façon autonome. Par conséquent, une géométrie discrétisée pourra être réemployée pour examiner divers scénarios, en ne changeant que les sources d'excitation ou les conditions aux limites. En outre, pour une optimisation de formes, l'utilisateur devrait avoir la possibilité de modifier un paramètre géométrique sans nécessiter de recommencer le maillage ou de redéfinir les conditions aux limites.

C'est pourquoi nous avons décidé d'adopter une nouvelle formulation qui convient mieux à

notre situation. C'est une approche dite directe qui permet de résoudre en même temps les équations couplées du champ magnétique et des circuits électriques. Cette méthode est intégrée dans le logiciel utilisant l'analyse par éléments finis. Flux-2D.

II.3.1 Logiciel FLUX-2D

C'est un programme de modélisation par éléments finis qui peut intégrer les phénomènes magnétiques et thermiques, tout en permettant une grande souplesse dans la représentation des systèmes en évolution. Par conséquent, il correspond idéalement à nos exigences. Nous n'allons pas expliquer son mécanisme ici, étant donné que les tutoriels existants sont déjà assez explicites et ce n'est pas le cœur de notre recherche [41].

Ce programme est conçu pour calculer et illustrer les valeurs pertinentes pour les ingénieurs concernant des dispositifs à symétrie bidimensionnelle ou de révolution, fabriqués à partir de matériaux aux caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou anisotropes. C'est un instrument exhaustif, qui possède des fonctionnalités de pointe comme l'application à des équations de circuits, ainsi que l'incorporation d'une zone particulière désignée sous le nom de « bande de roulement ». Ce dernier permet d'analyser les machines tournantes avec des positions de rotor changeantes, sans avoir besoin de changer ni la géométrie ni le maillage.

La résolution d'un problème s'appuie sur des modules spécialisés [44].

II.4 Module pré-processeur

Il donne la possibilité de déterminer l'ingénierie du système à examiner (PREFLU), de choisir et/ou élaborer un réservoir de matériaux (CLSMAT), d'identifier les traits physiques des divers champs d'ingénierie prédéfinis (PROPHY), ainsi que de dépendre les circuits électriques et/ou les données liées (CIRFLU). Il gère également la création automatique du maillage pour les géométries en deux dimensions (PREFLU).

II.4.1 Module processeur

Essentiellement composé d'un module de résolution 2D (SOLVER_2D) pour divers modèles courants en électromagnétisme et en problématique thermique.

II.4.2 Module post-processeur de Flux-2D(PostPro_2D)

Il offre, entre autres, la possibilité de dessiner les surfaces équipotentielles, les lignes de courant, le maillage et la géométrie, ainsi que des courbes en 2D ou en 1D selon un itinéraire préétabli. Il propose aussi la capacité de calculer des mesures globales comme le couple ou la

force exercée sur un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, et ainsi de suite. En règle générale, la figure illustre de manière schématique la chaîne de programmes Flux-2D, qui est intégrée dans une interface Windows.

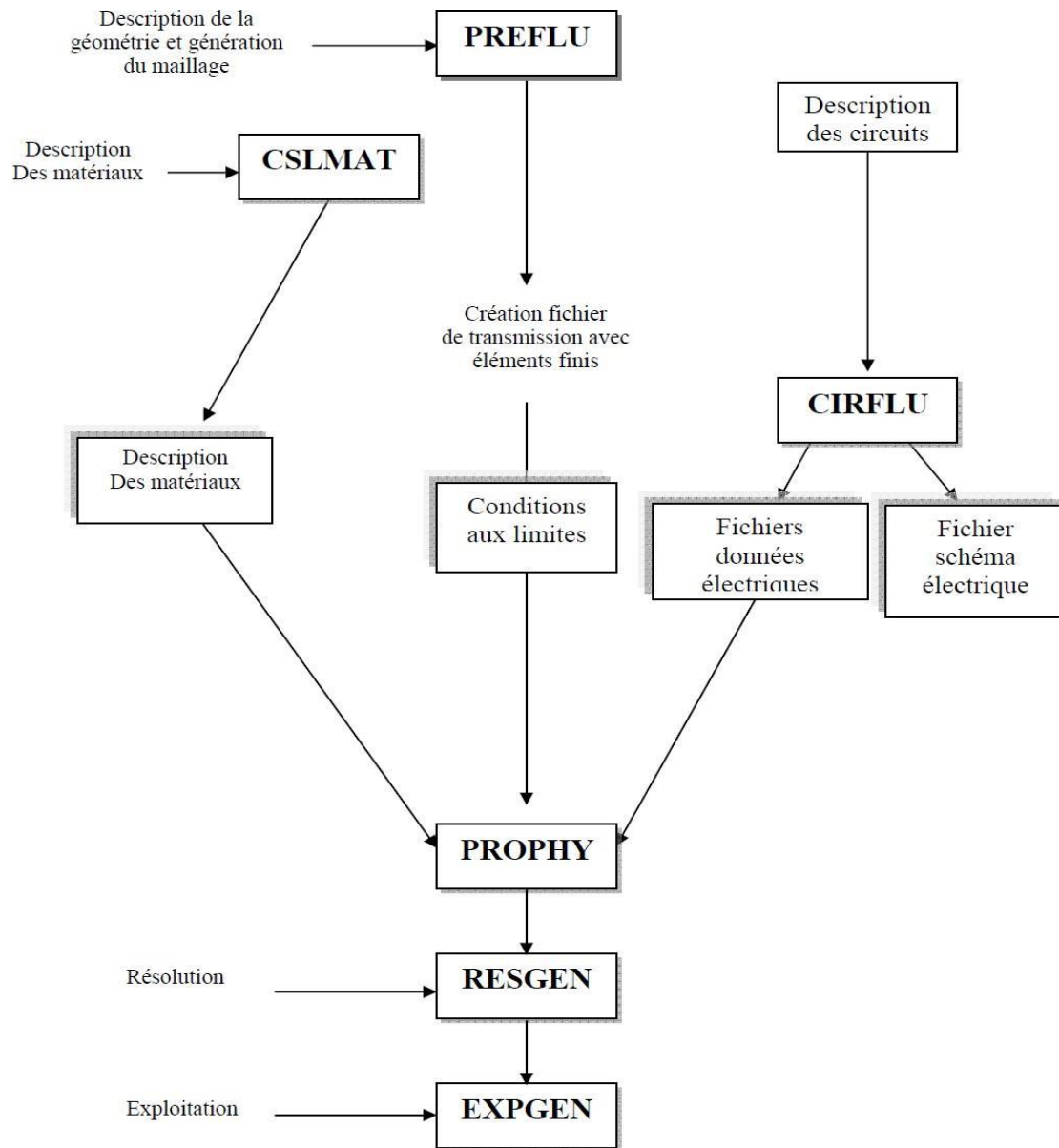


Figure II 1 : Schéma des différents modules du logiciel Flux

Même si le logiciel de flux sera exploité en 2D, la présentation en 3D des inclinaisons des encoches et des résultats finaux sera indispensable pour une analyse précise. Les raisons de cette décision sont évidentes. Vous êtes formé sur des données jusqu'à octobre 2023.

La durée de dissimulation est nettement plus longue en 3D qu'en 2D.

L'impact de l'angle des encoches n'est pas le principal objectif de notre recherche. - Les effets de bout sont représentés par des inductances et résistances déterminées de manière analytique. Cette approche paraît assez précise lorsqu'on la met en parallèle avec les simulations réalisées sous Flux3D.

II.5 Application à la simulation de la MASDE

On obtient une machine asynchrone double étoile à partir de rebobinage de la machine asynchrone qui a les caractéristiques suivantes :

Partie	Paramètre	Valeur	Unité
Machine	Puissance nominale	7.5	Kw
	Tension nominale	380	V
	Vitesse nominale	2898	tr/min
	Nombre de pôles	2	
	Fréquence	50	Hz
	Longueur active	125	Mm
	Nombre de phases	3	
	Type de connexion	Y	
Stator	Nombre d'encoches	24	
	Diamètre interne	120	Mm
	Diamètre externe	212	Mm
Rotor	Diamètre externe	119	Mm
	Diamètre interne	40	Mm
	Épaisseur de l'entrefer	0.5	Mm
	Nombre de barres	20	

Tableau II 1 : Caractéristiques statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.

La forme et les dimensions des encoches de stator et de rotor sont montrées sur la figure II.2.

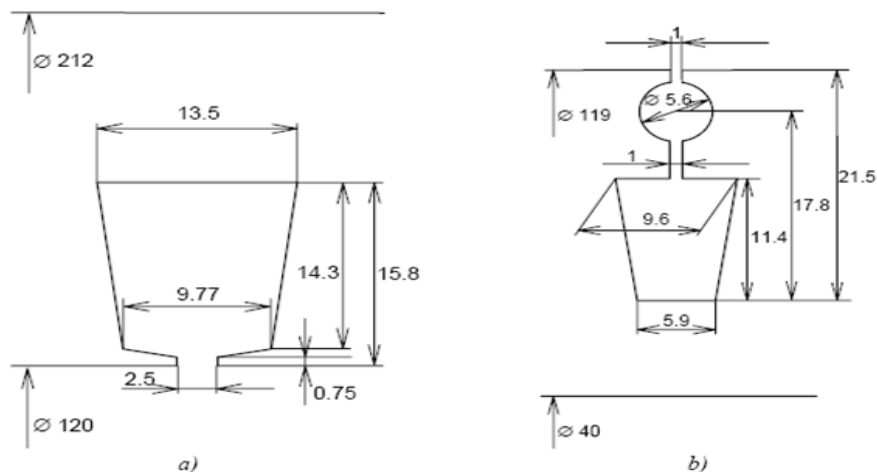


Figure II.2 : Dimension des encoches, a) l'encoche statorique, b) l'encoche rotorique

Le stator de la machine asynchrone (MAS) possède une configuration d'enroulement à double couche, avec un pas réduit de $8/12$ et une quantité de tours par phase de $W_{MAS} = 208$ rotations. Pour obtenir une machine asynchrone double étoile (MASDE) avec la même puissance que la machine initiale, le nombre de spires est réduit de moitié, tout comme la tension nominale, afin de maintenir un courant nominal identique. Par conséquent, $W_{MASDE} = 104$ tours par phase et $V_n = 190$ V.

L'enroulement du stator de la MASDE est donc un enroulement à quatre couches (voir Fig. II.3), comportant 104 tours par phase

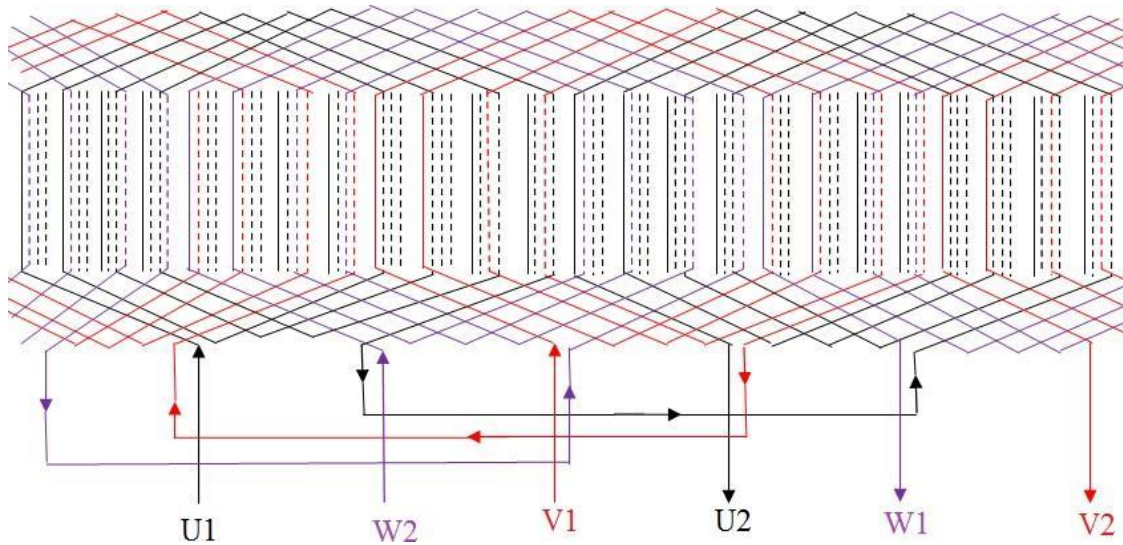


Figure II 3 : Bobinages statoriques de l'étoile 1 de la MASDE

Même chose pour l'étoile 2 , mais avec un décalage de deux encoches.

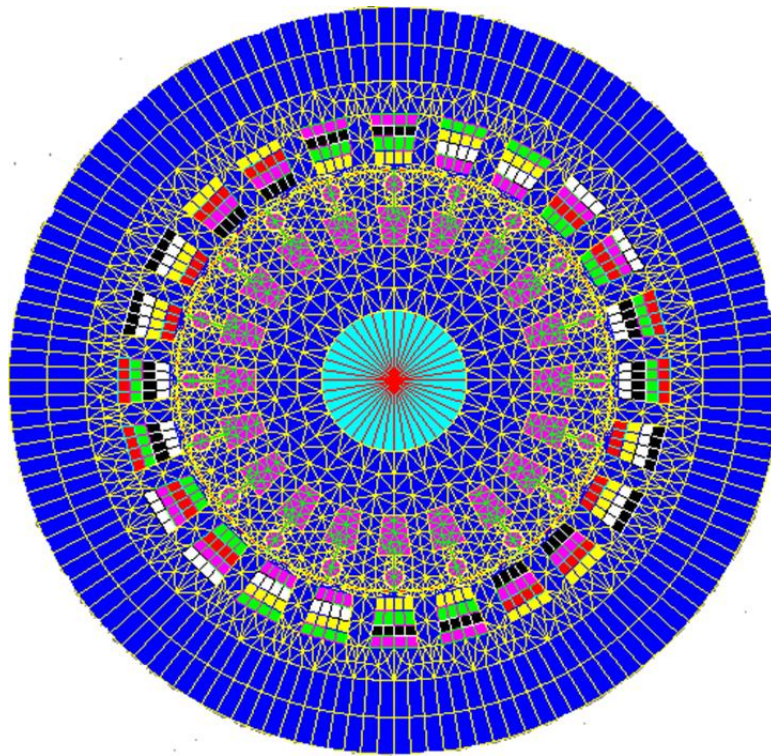


Figure II.4 représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine

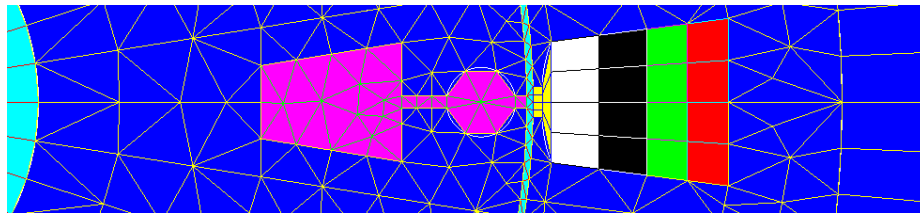


Figure II.5 représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.

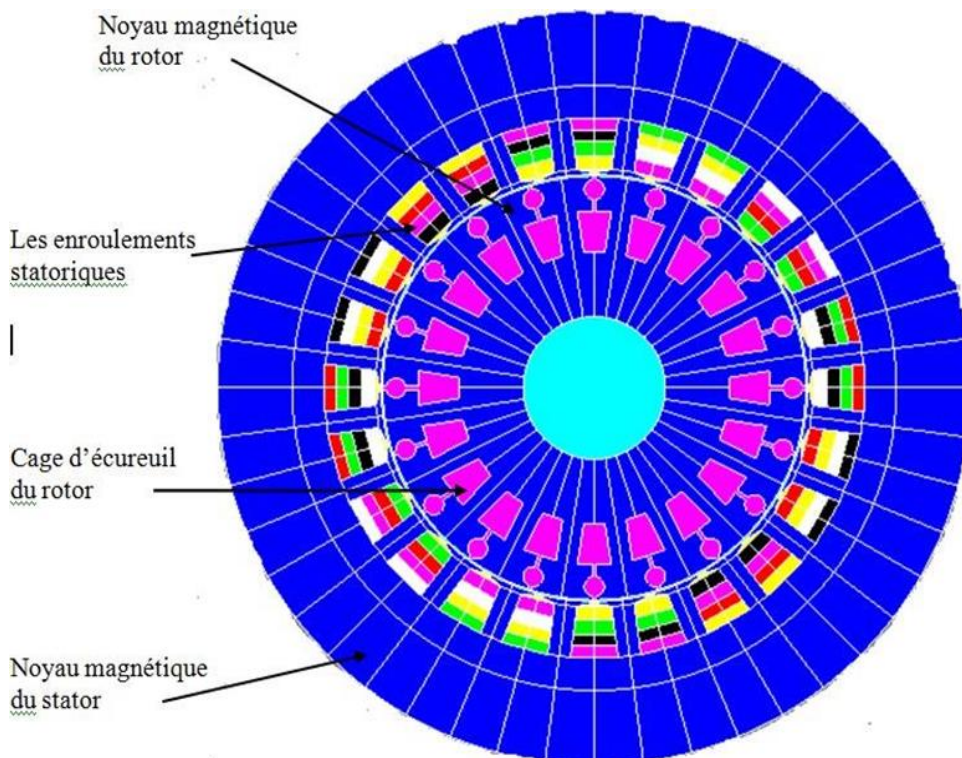


Figure II.6. L'induction magnétique

Le maillage est perfectionné dans la zone d'entrefer, l'endroit où l'énergie électromagnétique se concentre. Cependant, il devient plus grossier près de l'arbre et en périphérie de la culasse pour minimiser les temps de calcul sans compromettre de manière significative la exactitude des résultats. De plus, le boîtier externe de l'appareil, qui est conducteur, est habituellement relié à la terre.

II.6 Matériaux

II.6.1 Matériaux conducteurs

On suppose que les conducteurs du stator sont disposés de manière uniforme dans les encoches. Pour modéliser cette zone, on prendra en considération la résistivité du cuivre à une température correspondant à celle de fonctionnement des enroulements, tout en tenant compte du taux d'occupation et du nombre de bobines par encoche. En ce qui concerne le rotor, c'est la résistivité de l'aluminium à une température spécifique qui sera prise en compte.

II.6.2 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)

H1 [A/m]	B1 [T]	H2 [A/m]	B2 [T]	H3 [A/m]	B3 [T]	H4 [A/m]	B4 [T]
0	0.0	2000	1.61	7000	1.83	40000.0	2.14
300	0.66	3000	1.69	8000	1.85	50000.0	2.16
500	1.09	4000	1.73	10000	1.89	60000.0	2.18
1000	1.45	5000	1.76	20000	2.04	70000.0	2.19
1500	1.56	6000	1.79	30000	2.11	/	/

Tableau II 2 : B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN [11]

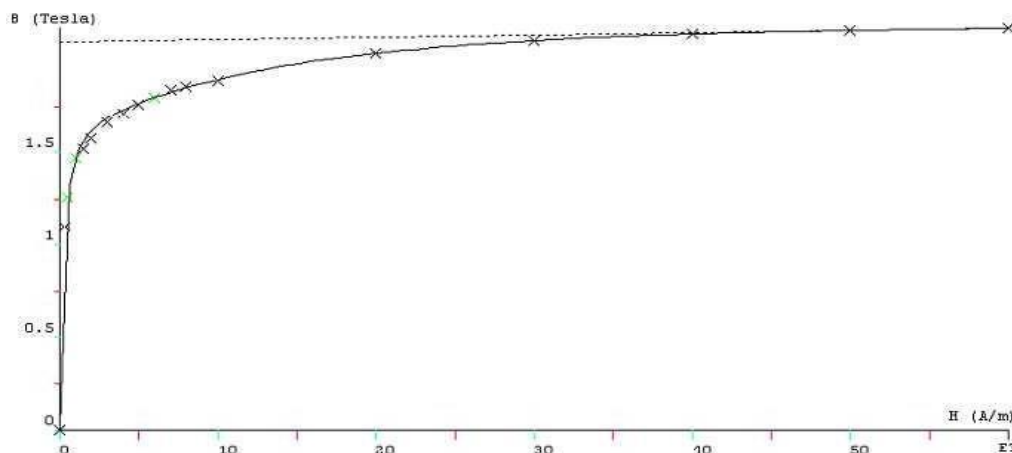


Figure II 7: Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN

II.7 Couplage avec les équations de circuit

Pour représenter fidèlement le moteur, il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court-circuit).

Le circuit électrique, (Fig. II.7), représentant : les sources de tension d'alimentation (V_U , V_V , V_W , V_{U1} , V_{V1} , V_{W1}),

Les bobinages statoriques (B_U , B_V , B_W , B_{U1} , B_{V1} , B_{W1}) les Inductances de fuite' (L_U , L_V , L_W , L_{U1} , L_{V1} , L_{W1}), les résistances de chute de tension dans le réseaux (R_U , R_V , R_W , R_{U1} , R_{V1} , R_{W1}), les résistances des voltmètres pour mesurer les tensions statoriques ($R1$, $R2$, $R3$, $R4$, $R5$, $R6$).

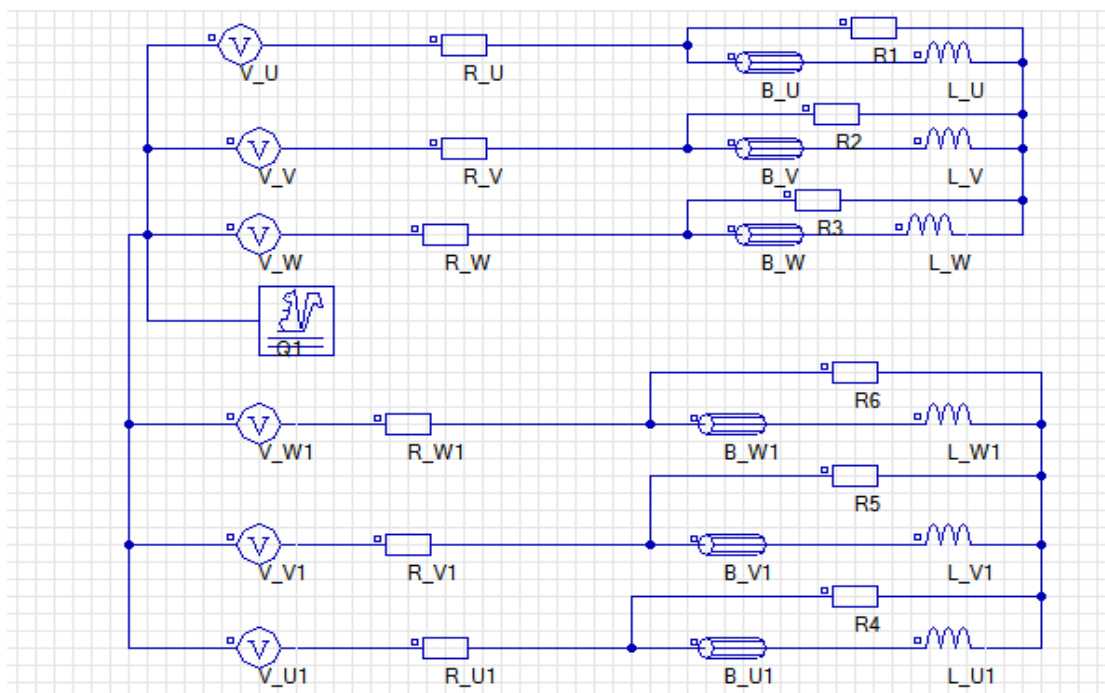


Figure II 8 : Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.

Q1 : est un macro-circuit (un dispositif du logiciel Flux 2D®) utilisé pour modéliser la cage d'écurie de la machine, c'est un circuit fermé contient des barres rotorique

(Fig.II.8) : Barre (berk), résistances (R_{ik}), inductances de fuite ($L_{\sigma ik}$), correspondent aux régions d'inter-barre d'anneaux de court-circuit (arcs entre deux barres adjacentes).

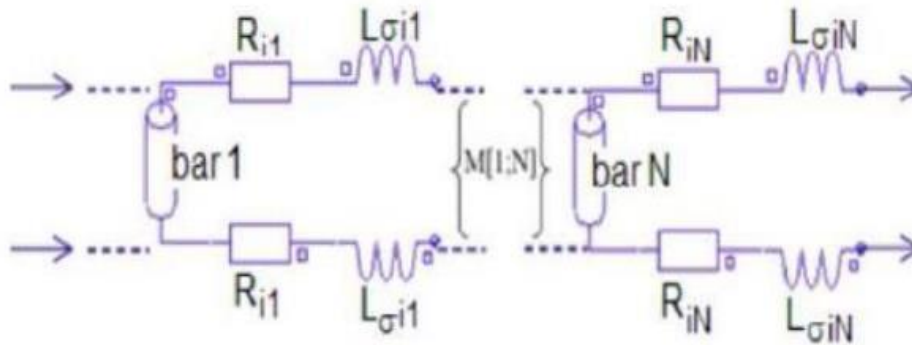


Figure II.9: Circuit équivalent de la cage d'écureuil.

Ce lien est utilisé dans les simulations destinées à reproduire les variables du moteur en situation de charge. À l'opposé des méthodes antérieures qui faisaient abstraction des courants induits dans le rotor, ces derniers sont dorénavant considérés. Cela rend impérative la modélisation des circuits de la cage. De plus, cette technique autorise un démarrage direct du moteur, ce qui évite le besoin d'un fonctionnement continu, requis en l'absence de couplage. [37].

II.8 Résultats de simulation

. Bien qu'il existe une variété de méthodes numériques, la représentation du régime magnétodynamique dans les dispositifs électriques reste une tâche ardue, essentiellement en raison du déplacement relatif entre le rotor et le stator qui rend le couplage magnétique plus complexe [38]. La partie suivante détaille le calcul du MASDE en régime transitoire basé sur l'électromagnétisme.

II.8.1 Fonctionnement à vide

Les figures II.9 illustrent l'évolution des grandeurs locales (lignes de champ magnétique, induction magnétique) ainsi que des grandeurs globales à vide sous une tension nominale de 190 V, telles que les courants, le couple électromagnétique, la vitesse et la puissance.

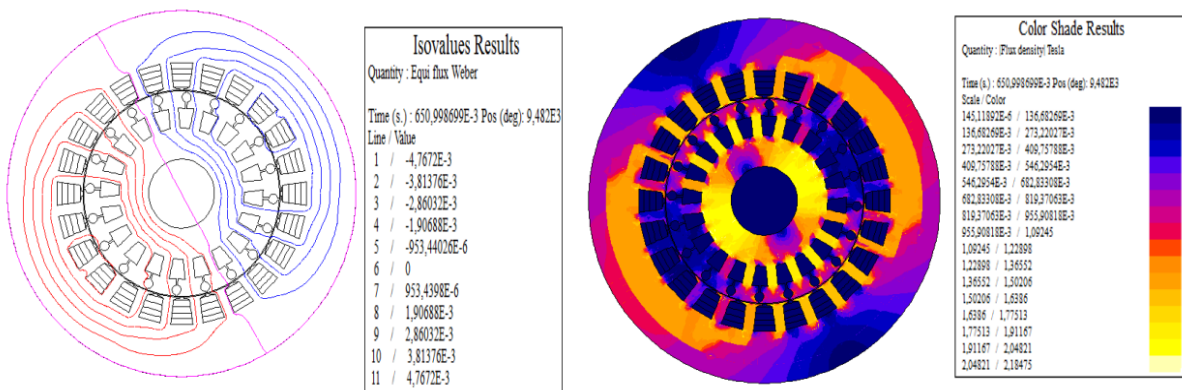


Figure II.10 : Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique à vide à t = 0.65s.

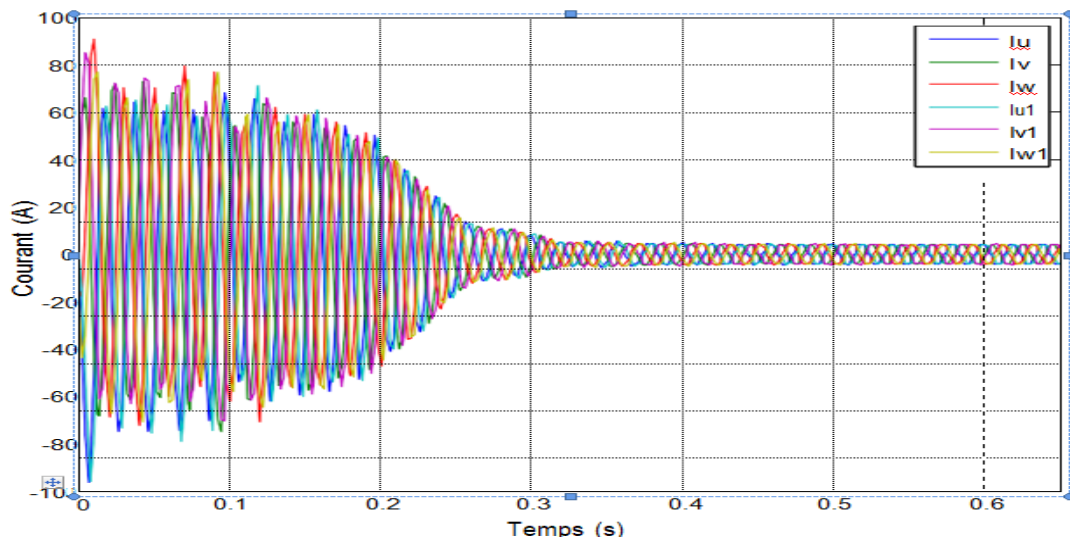


Figure II.11: Courants statoriques à vide.

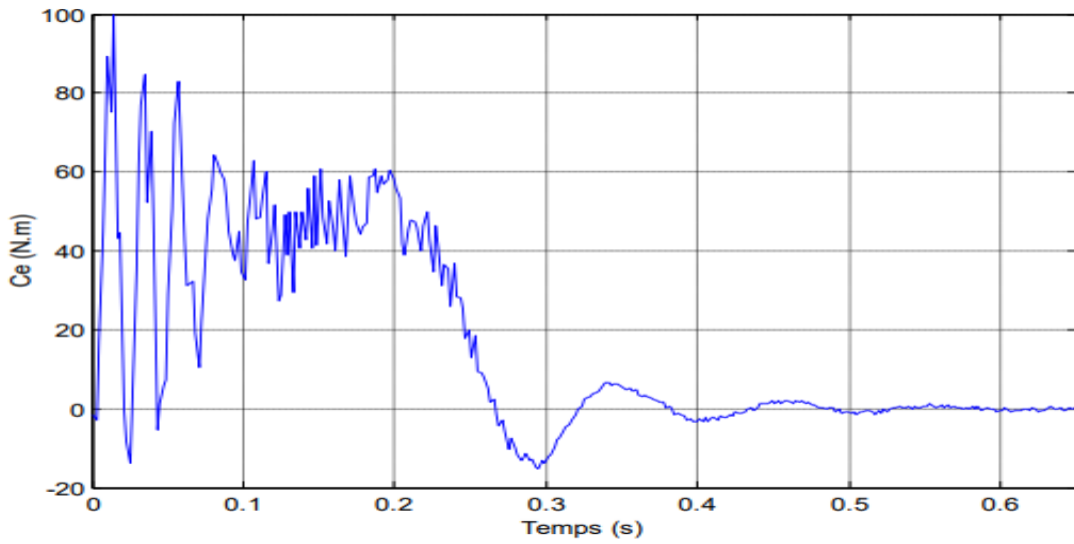


Figure II 12 : Couple électromagnétique

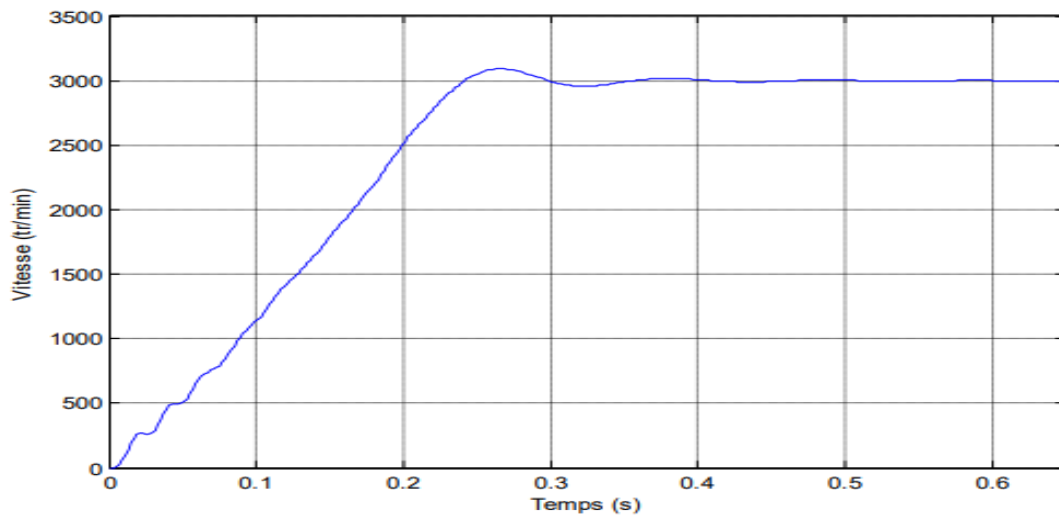


Figure II.13: Vitesse de rotation.

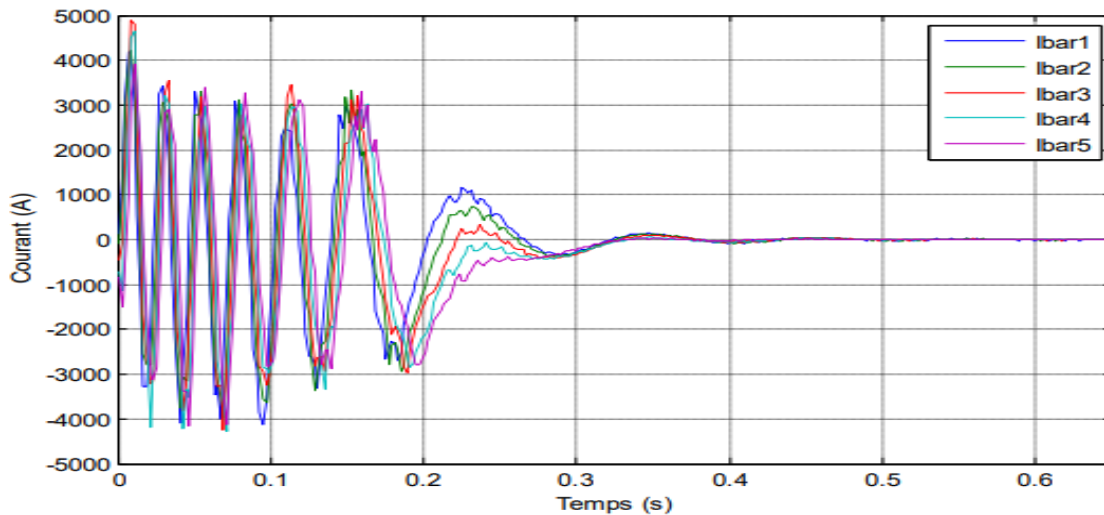


Figure II.14: Courants rotoriques à vide

Suite à une phase de transition d'à peu près 0,4 seconde (Figure II.11) pendant laquelle la machine se magnétise, les courants du stator s'approchent d'un état stable avec une intensité efficace de 3,61 A. Les trois phases d'un même bobinage en étoile sont décalées électriquement de 120°, alors qu'un décalage de 30° est noté entre les deux sources d'alimentation. Cela indique un comportement généralement stable de la machine, même si l'onde des courants n'est pas exactement sinusoïdale. Cette déformation est essentiellement due aux phénomènes de saturation magnétique et à l'existence des entailles. En état stable, le couple électromagnétique en absence de charge devient pratiquement nul (Figure II.12). Les lignes de champ L'induction magnétique et la répartition de l'induction à t = 0,65 s (Figure II.10) démontrent explicitement le couplage des lignes de champ via l'entrefer.

II.8.2 Fonctionnement en charge

Sous la même tension (190v), nous avons présenté sur les Figures II.14, les caractéristiques de la machine en régime nominal.

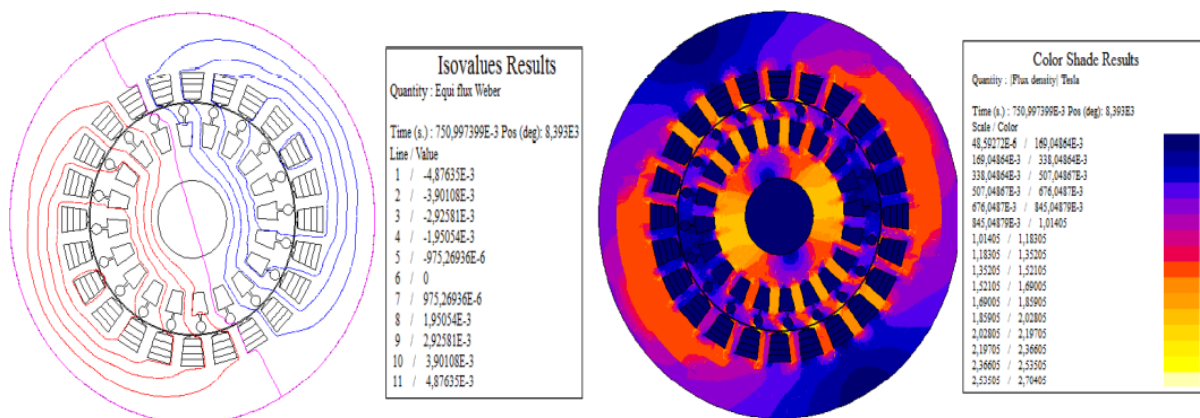


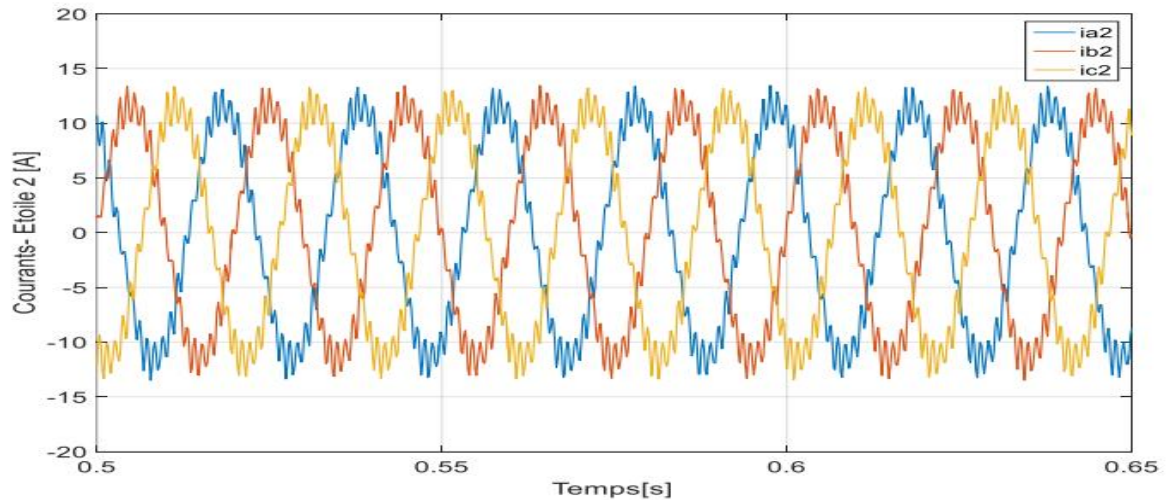
Figure II 15: Lignes du champ magnétique et l'induction magnétique en charge à $t = 0.75$ s.

Figure II 16 : courant de phase statorique étoile 1 dans la machine a saine

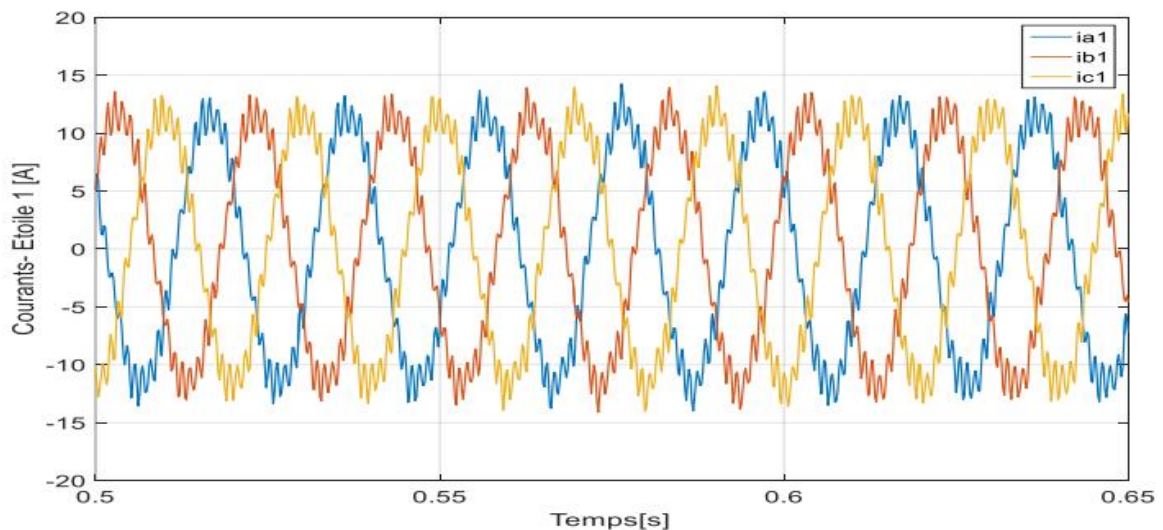


Figure II 17 : courant de phase statorique étoile 2 dans la machine a saine

Les enroulements étoiles 1 et 2 du stator atteignent un état d'équilibre avec une intensité efficace de 13 A. La machine opère de façon constante et sans interruptions grâce à l'écart de 120° entre les trois phases du courant.

La figure III.17 dépeint les courants qui passent à travers les barres du rotor. Selon notre recherche, le courant efficace dans une barre s'élève à 4490 A, avec une fréquence calculée grâce à la formule $(1 - g) \times f_s / p$. Dans cette équation, g représente le glissement, f_s la fréquence du réseau et p symbolise le nombre de paires de pôles.

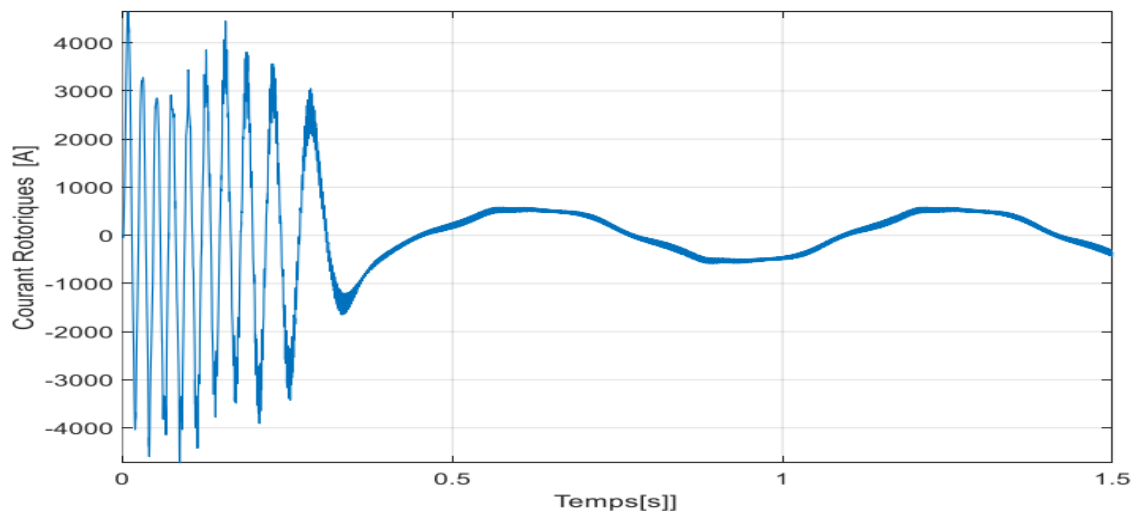


Figure II.18 : courant rotoriques de MASDE, dans la machine saine

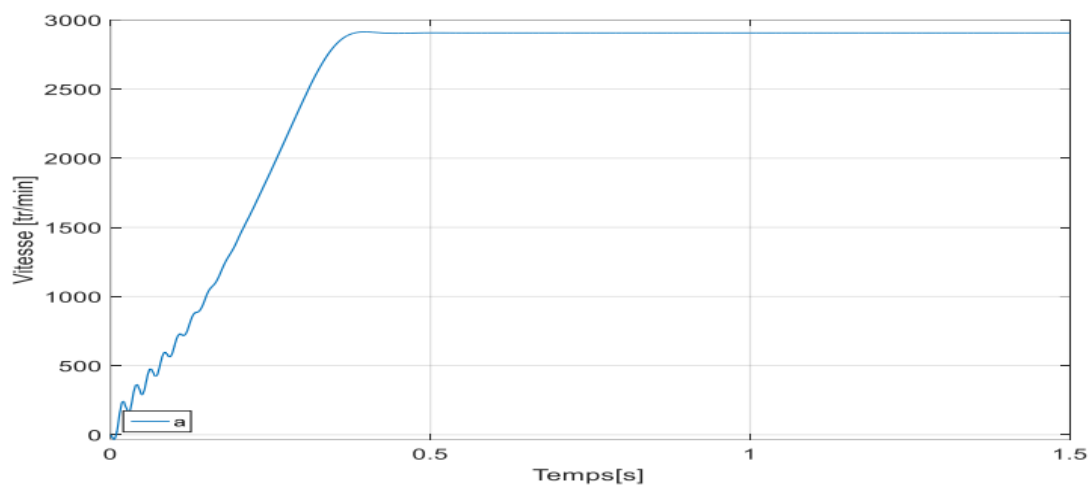


Figure II 19 : Vitesse rotoriques de MASDE, dans la machine saine

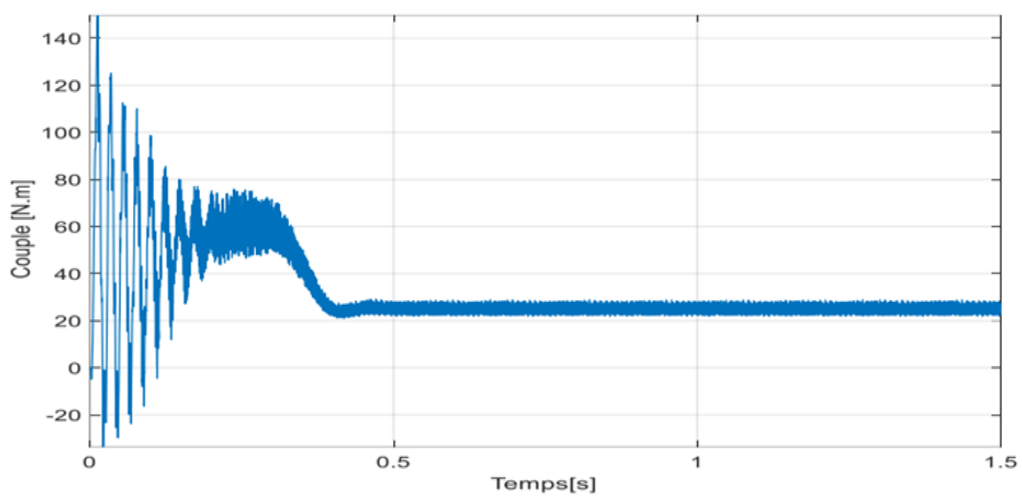


Figure II 20 : couple rotoriques de MASDE, dans la machine saine

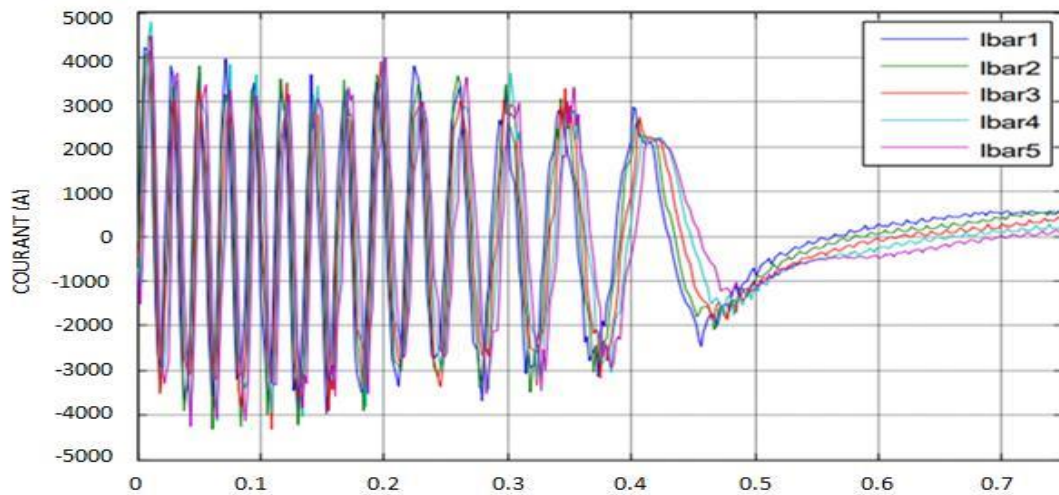


Figure II 21: Courants rotoriques en charge dans les barres 1,2.....5.

Sous des conditions de fonctionnement normales, l'influence de la saturation sur le comportement magnétique de la machine est moins marquée (Figure II.19).

Durant la phase de transition, le couple électromagnétique (Figure II.20) commence à partir de zéro et augmente graduellement jusqu'à atteindre la valeur nominale de 27 Nm. Par la suite, le couple se stabilise autour de ce chiffre, bien que des fluctuations demeurent en régime établi à la vitesse nominale.

II.9 Conclusion

Dans ce second chapitre, nous avons élaboré un modèle numérique pour la machine asynchrone à double étoile, en utilisant la méthode des éléments finis sous logiciel Flux® 2D.

Nous avons donc réalisé la modélisation, la simulation et l'analyse des performances dynamiques de la MASDE dans deux configurations : sans charge et avec charge. Les résultats obtenus ont permis d'apprécier le degré d'acceptabilité des propriétés électromagnétiques calculées. Ces simulations fournissent une représentation plus précise du fonctionnement de la machine dans des conditions particulières, ce qui peut aider à affiner ses performances et à perfectionner ses propriétés électromagnétiques.

Dans la suite, une simulation en régime transitoire a été effectuée, ce qui a permis d'analyser plus en détail le comportement dynamique de la MASDE.

Chapitre 3 : diagnostic de la MASDE par l'analyse de flux de fuite

III 1/ Introduction

L'identification des anomalies dans les machines asynchrones est une phase cruciale pour garantir leur performance et prévenir les interruptions de production inattendues. Parmi les problèmes fréquemment observés, on note les ruptures des barres du rotor, susceptibles de déformer le champ magnétique en rotation, de générer des vibrations mécaniques et d'amoinrir l'efficacité globale de l'appareil. L'examen fréquentiel du courant du stator et du flux magnétique de fuite constitue une technique non intrusive et performante pour détecter ces anomalies par la surveillance des composantes fréquentielles latérales autour de la fréquence fondamentale.

Dans ce chapitre, nous examinons trois scénarios de la machine : un scénario sain, un scénario où une barre est cassée, et un scénario où trois barres sont cassées. Le but est d'examiner le profil fréquentiel spécifique à chaque cas pour assurer une identification rapide et précise des anomalies.

III 2/Influence d'une rupture de barre dans une machine asynchrone double étoile

Dans les machines asynchrones double étoile, les perturbations électromagnétiques sont souvent dues à des défauts rotoriques, tels que la rupture de barres. Ces défaillances entraînent des fluctuations du couple électromagnétique, occasionnant des variations dans la vitesse de rotation.

L'information concernant une rupture de barre est transmise par le champ magnétique, ce qui implique qu'elle se reflète aussi bien dans le courant absorbé par le réseau pour un ou deux systèmes d'enroulement statorique. Il est donc crucial de déterminer les fréquences spécifiques à une rupture de barre pour pouvoir les repérer grâce à l'analyse spectrale des courants du stator. [42]

Lorsqu'il y a une rupture de barre dans le rotor, les circuits rotoriques ne créent plus seulement un champ magnétique direct, mais génèrent aussi un champ inverse de pulsation qui découle du déséquilibre des courants au sein de la cage du rotor. Ce champ inverse agit en interaction avec les deux champs de stator décalés de la machine double étoile, engendrant des perturbations dans les deux systèmes d'enroulement.

L'apparition de composantes fréquentielles du signal donc une défaillance d'une barre type : $(1 \pm 2g) \cdot f_s$

Dans une machine à double étoile, l'effet est d'autant plus prononcé, puisque la séparation spatiale entre les deux bobinages facilite une observation plus précise des signatures de fréquence. Il est donc possible de détecter ces composants de façon plus précise en effectuant

une analyse spectrale croisée sur les deux courants du stator. Par conséquent, la rupture d'une barre dans une machine asynchrone double étoile produit un champ tournant inversé à la vitesse qui génère des forces électromotrices indésirables dans le stator, entraînant l'émergence de courants statoriques incluant les composantes dans les deux configurations triphasées du stator. [42]

III 3/ Simulation des défauts de cassure des barres rotoriques

Les figures III.1 représentent la répartition des lignes de flux magnétique dans une machine asynchrone à double étoile saine, machine avec une barres cassée et machine avec trois barres cassées.

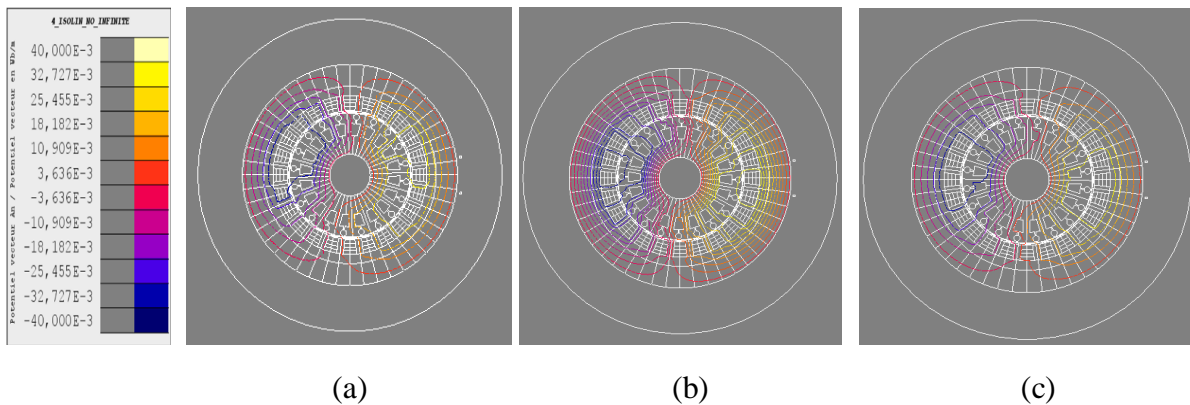


Figure III 1 : Répartition des lignes équiflux :(a) une machine saine (b) une seule barre cassée, (c) trois barres cassées.

On observe que plus le nombre de barres cassées augmente, plus la symétrie du champ magnétique est perturbée, ce qui indique une influence directe sur le comportement électromagnétique de la machine. Ces perturbations sont bien visibles dans la distorsion des lignes d'équiflux, notamment dans la zone du rotor.

La figure III.2 illustre la répartition des lignes de flux magnétique de fuite à l'extérieur de la machine pour trois cas de fonctionnement.

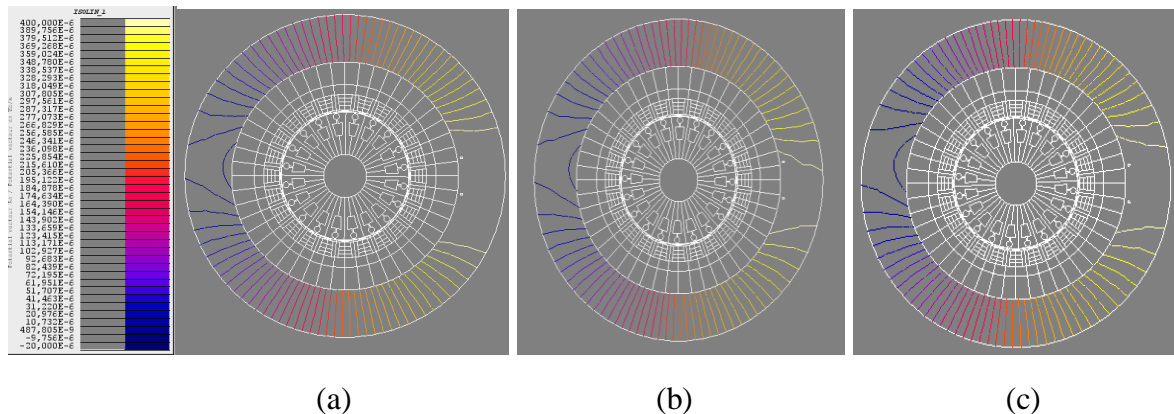


Figure III 2 : Répartition des lignes équiflux :
(a)une machine sain (b) une seule barre cassées, (c) trois barre cassées

En comparant les trois cas, on remarque que la figure III.2.a (a) montre une distribution symétrique et régulière du champ magnétique, ce qui traduit un fonctionnement normal de la machine. En revanche, la présence d'une seule barre cassée dans le cas (b) provoque une légère perturbation du champ, tandis que le cas (c), avec trois barres cassées, révèle une déformation importante des lignes de flux, indiquant un déséquilibre magnétique significatif.

La figure III.3 présente la répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique d'une machine électrique, pour trois scénarios distincts :

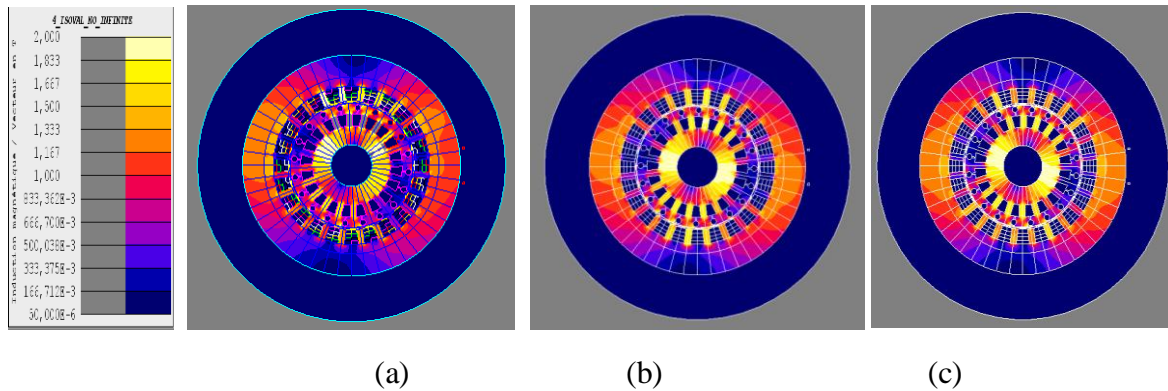


Figure III 3 : Répartition de l'induction dans le circuit magnétique :

(a)une machine sain (b) une seule barre cassées, (c) trois barre cassées

La forme des distributions de l'induction, illustrée dans la figure III.3, reflète la présence d'un déséquilibre causé par la rupture de certaines barres du rotor. Ce déséquilibre entraîne une induction magnétique asymétrique. En cas de déséquilibre total entre les pôles de la machine, l'induction devient fortement élevée, ce qui constitue la principale cause de l'augmentation du nombre de barres cassées.

La Figure III.4 montre les six courants de la MASDE a l'état saine, On observe des formes d'onde parfaitement sinusoïdales, symétriques et régulières en amplitude et en fréquence. Cela traduit un fonctionnement normal de la machine, sans perturbation dans le circuit magnétique ou électrique.

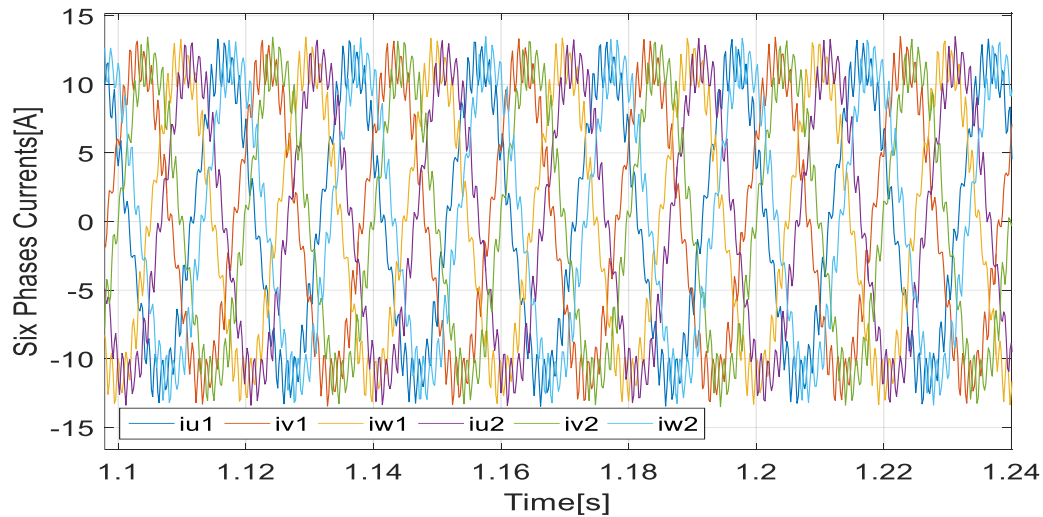


Figure III 4 : courant de phase, dans la machine saine.

La Figure III.5 présente les six courants statoriques avec une barre du rotor cassée, une légère distorsion commencent à apparaître dans les signaux de courant. On note la présence d'ondulations supplémentaires qui traduisent un déséquilibre magnétique localisé dû à la défaillance d'une barre.

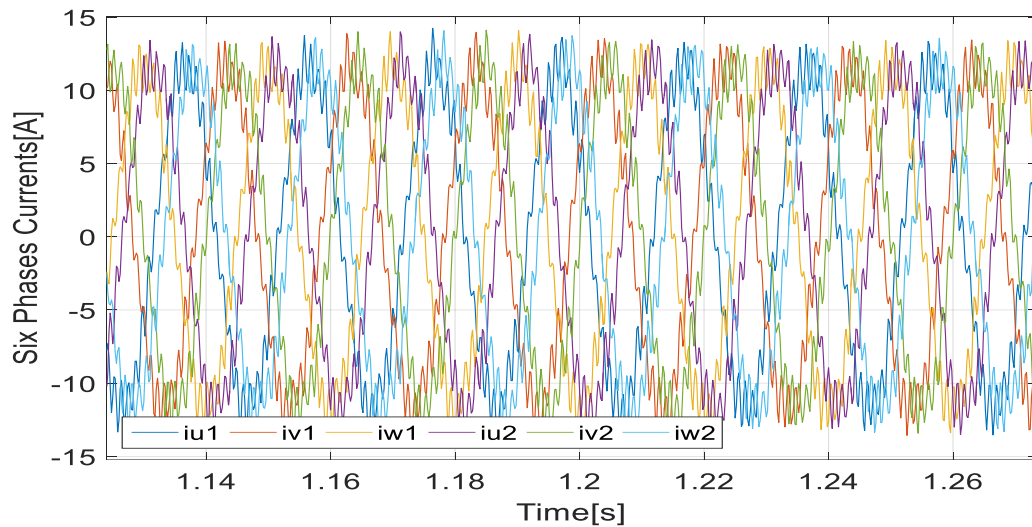


Figure III 5 : courant de phase, dans la machine avec un une barre cassée.

La Figure III.6 montre les six courants statoriques avec trois barres cassées, les courants deviennent fortement déformés, non sinusoidaux et irréguliers. Cela reflète une perturbation sévère dans le champ magnétique, pouvant entraîner des pertes accrues, du bruit, des vibrations, voire une instabilité du fonctionnement.

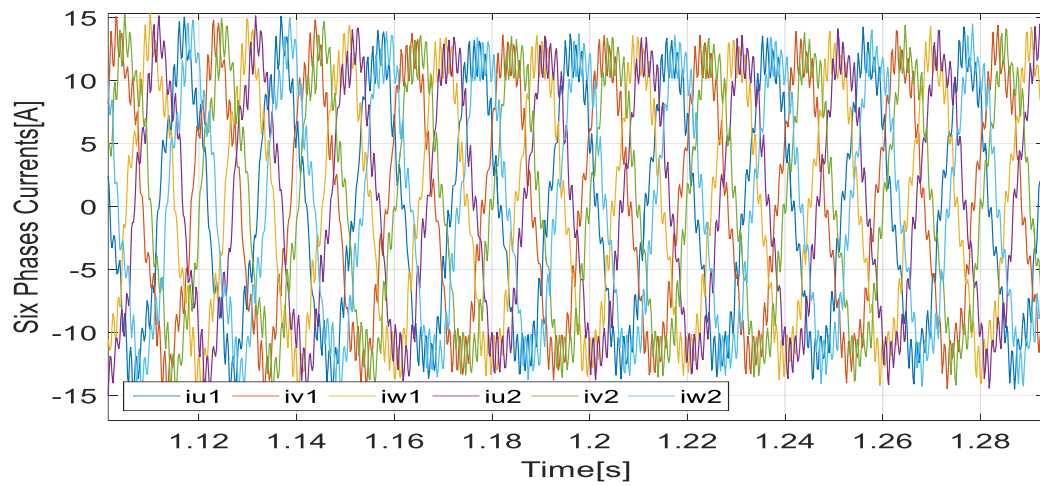


Figure III 6 : courant de phase dans la machine avec une 3 barre cassée

La Figure. III.7 représente l'évolution du courant de barre rotorique dans une machine électrique asynchrone dans les trois conditions de fonctionnement.

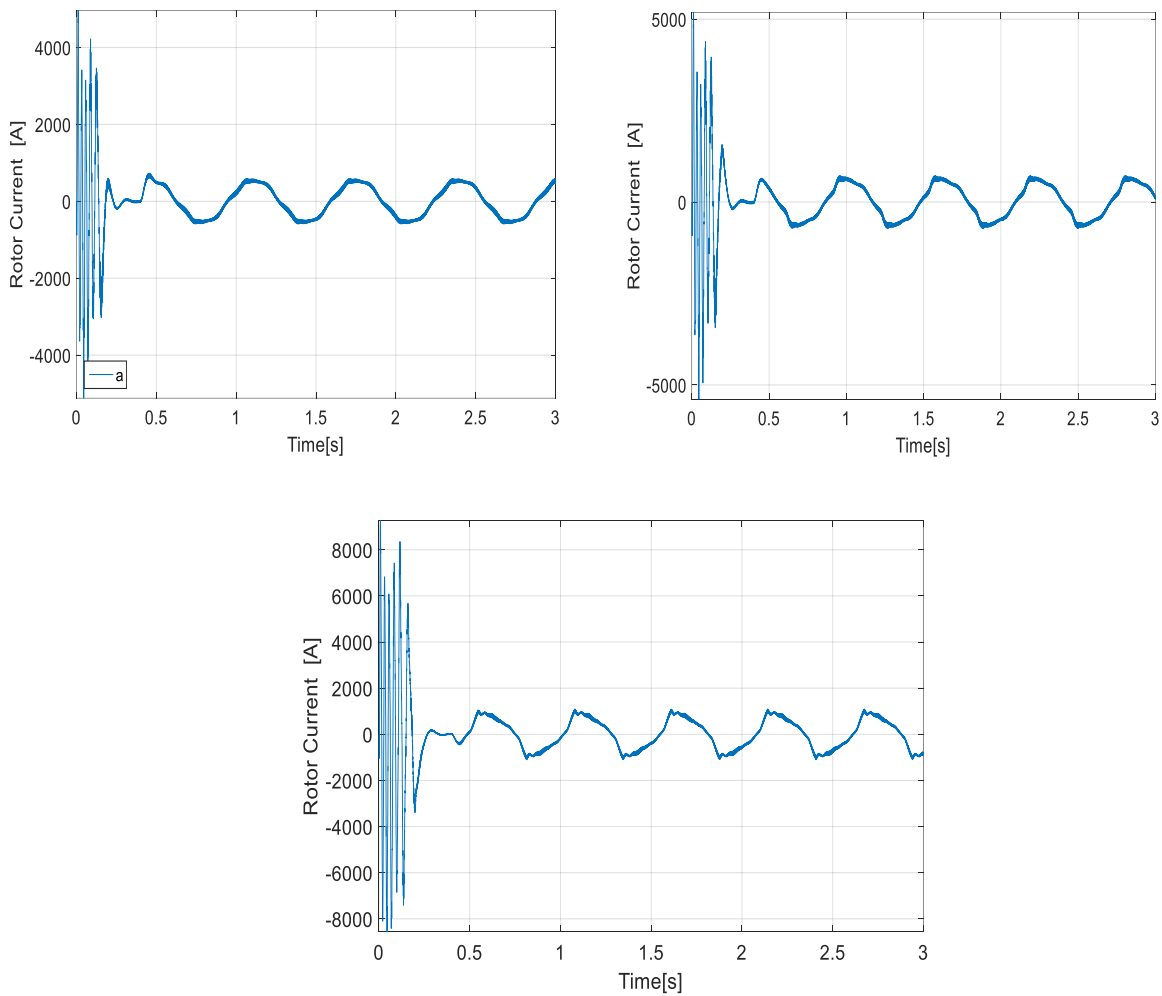


Figure III 7 : Courant de barre ((a)une machine saine (b) une barre cassée, (c) trois barres cassées.

La figure III 7 montre l'évolution du courant rotorique dans trois conditions différentes. On remarque un pic au démarrage suivi d'oscillations. Ces variations permettent de détecter d'éventuels défauts comme un déséquilibre ou une anomalie dans les enroulements du rotor.

Le Figure III.8 représente la tension induite capturé par le capteur de flux dans les trois états différents de la machine. En remarque une déformation de signal de flux de fuite en particulier dans le cas de la machine avec trois barres cassées.

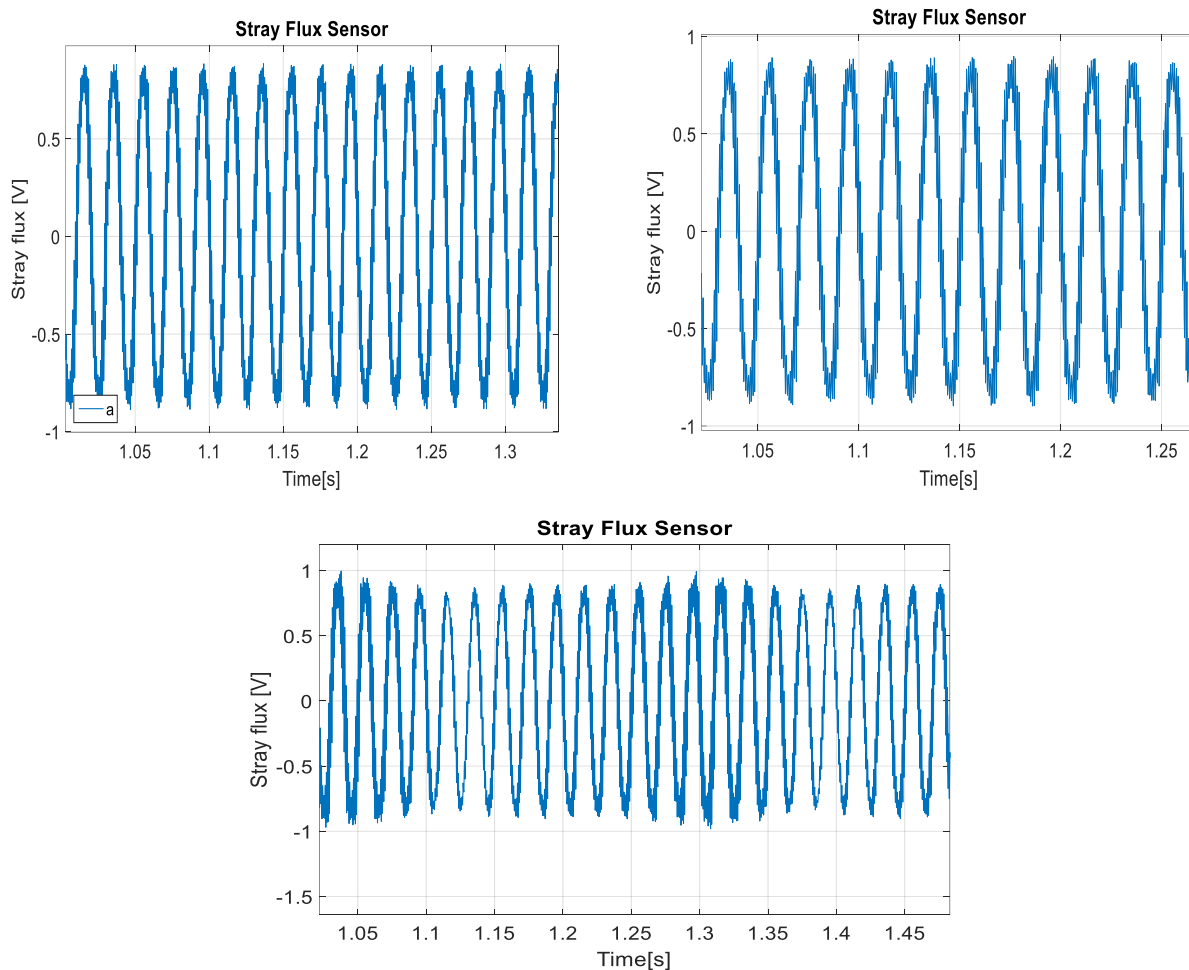


Figure III.8: tension induite délivré par le capteur bobiné dans le cas
 (a) machine saine (b) une barre cassées, (c) trois barre cassées.

Le Figure III.9 représente le couple électromagnétique de la machine dans les trois cas de fonctionnement. Les résultats montrent que plus le nombre de barres cassées augmente, plus les oscillations du couple deviennent importantes. Cela indique une dégradation des performances dynamiques de la machine, soulignant l'importance de la détection des défauts pour éviter les dysfonctionnements.

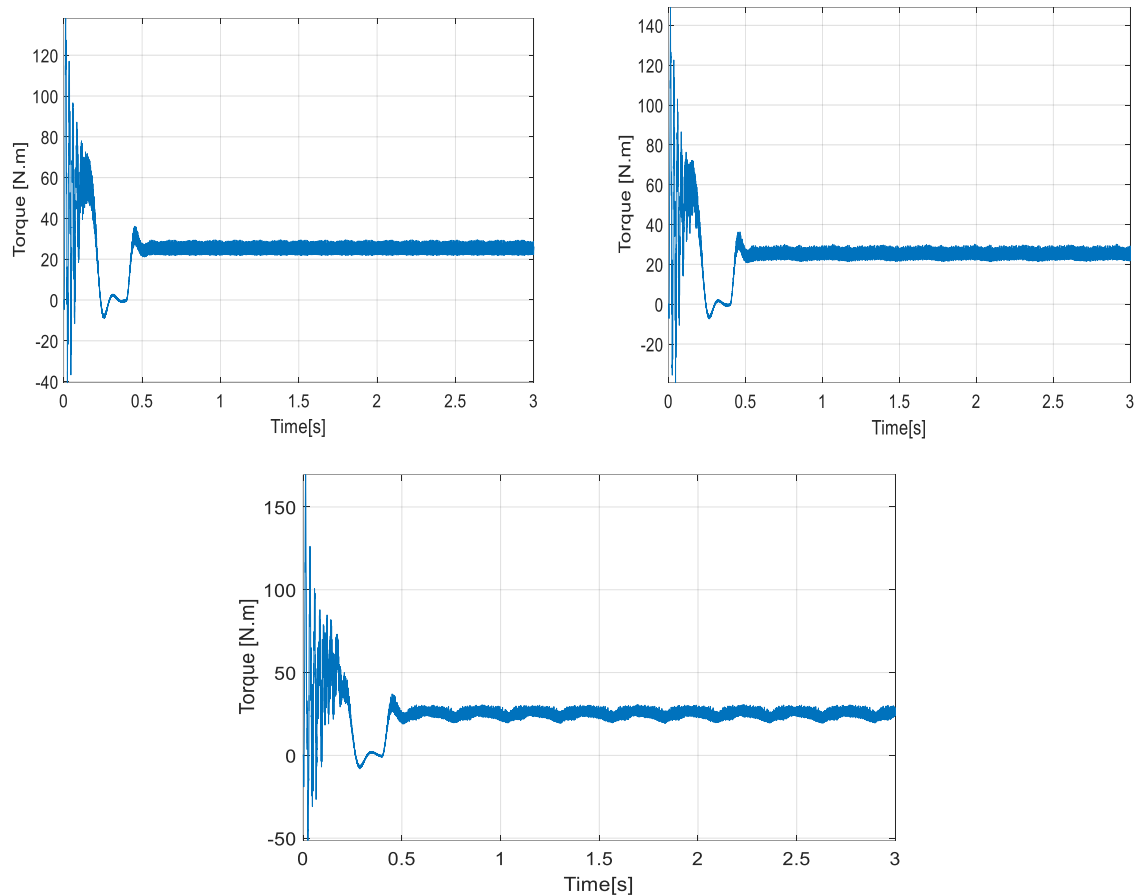
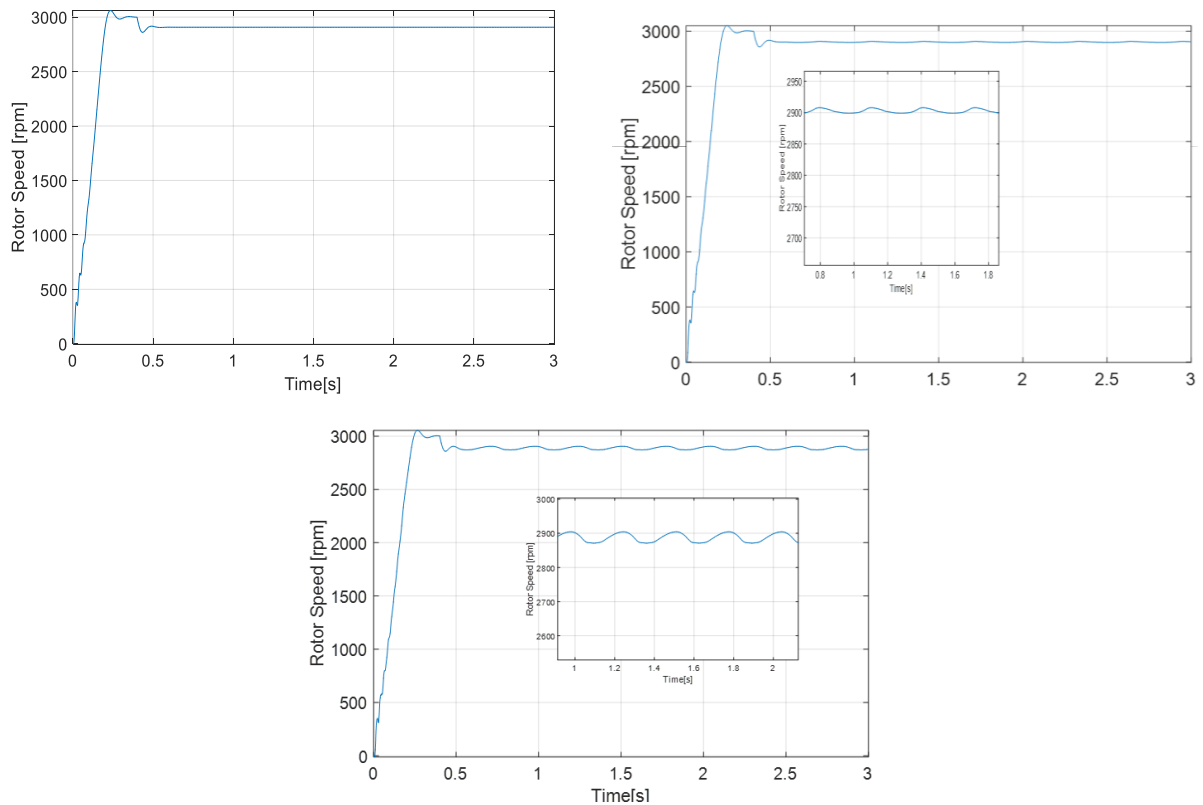


Figure III 9 : le couple de la machine avec une (a)une machine sain (b) une seule barre cassées, (c) trois barre cassées

Le Figure III.10 représente la vitesse de rotation de la machine dans les trois cas de fonctionnement., on peut observer que le défaut génère des oscillations de vitesse, ces variations dues aux fluctuations de couple sont en basse fréquence. On trouve une période correspondant à la fréquence $2g_f$. Aussi, nous pouvons voir que ces oscillations sont beaucoup plus influencées par la barre cassée.



Le Figure III 10 : La vitesse de la machine avec une (a)une machine saine (b) une seule barre cassée, (c) trois barres cassées

III 4/Diagnostic de la MASDS par l'analyse fréquentielle(FFT) de courant

Dans les sections suivantes, l'analyse harmonique du courant du stator pour la machine saine et défectueuse sera présentée. Les Figures. 11 à 13 rapportent le spectre du courant stator à pleine charge. Bien que les résultats montrent l'apparition des composants bien connus liés au défaut $(1 \pm 2k)fs$ autour des fréquences f_s . Dans notre machine cette valeur est égale à 54 Hz

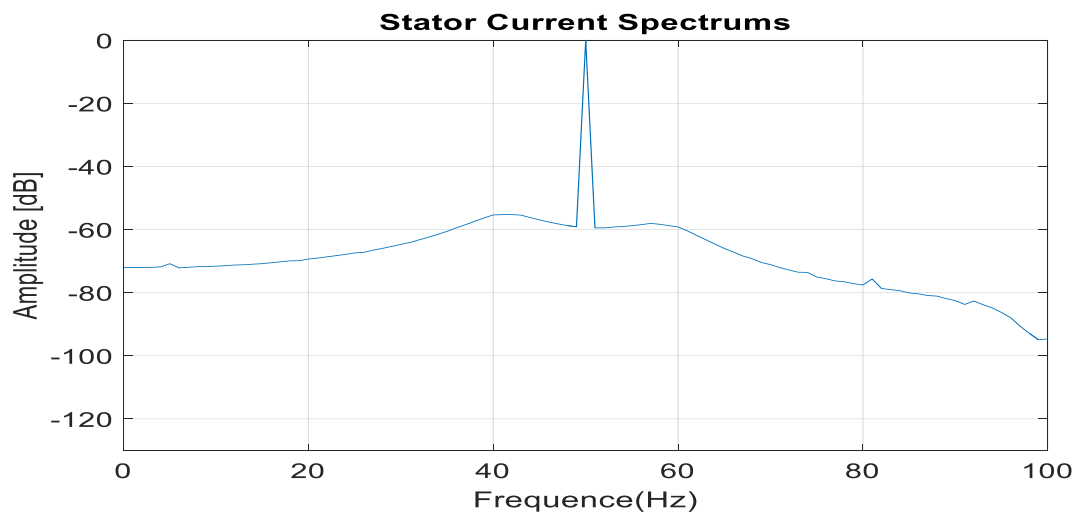


Figure III 11 : Spectres du courant statorique- machine saine

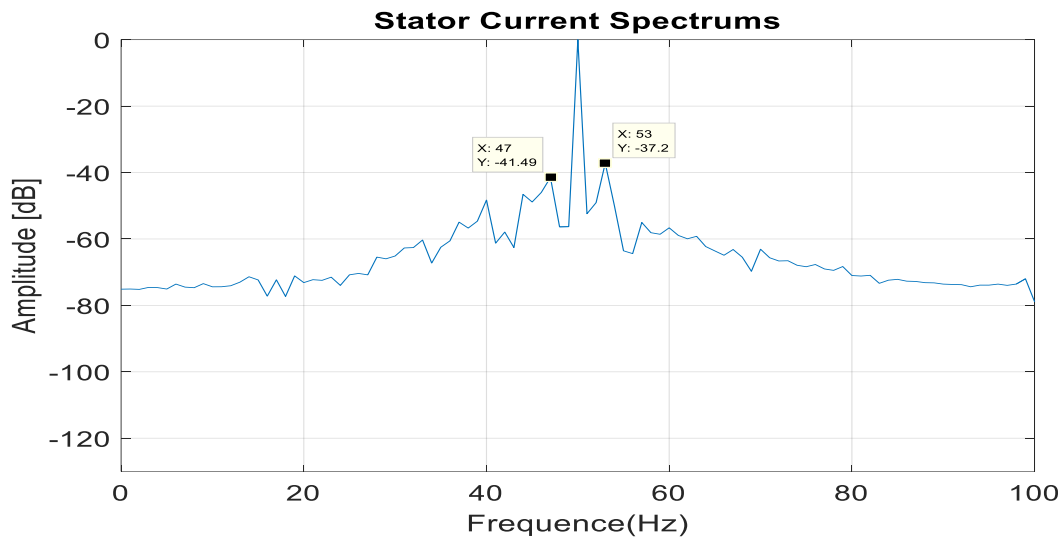


Figure III 12 : Spectres du courant statorique- machine avec une barres cassée.

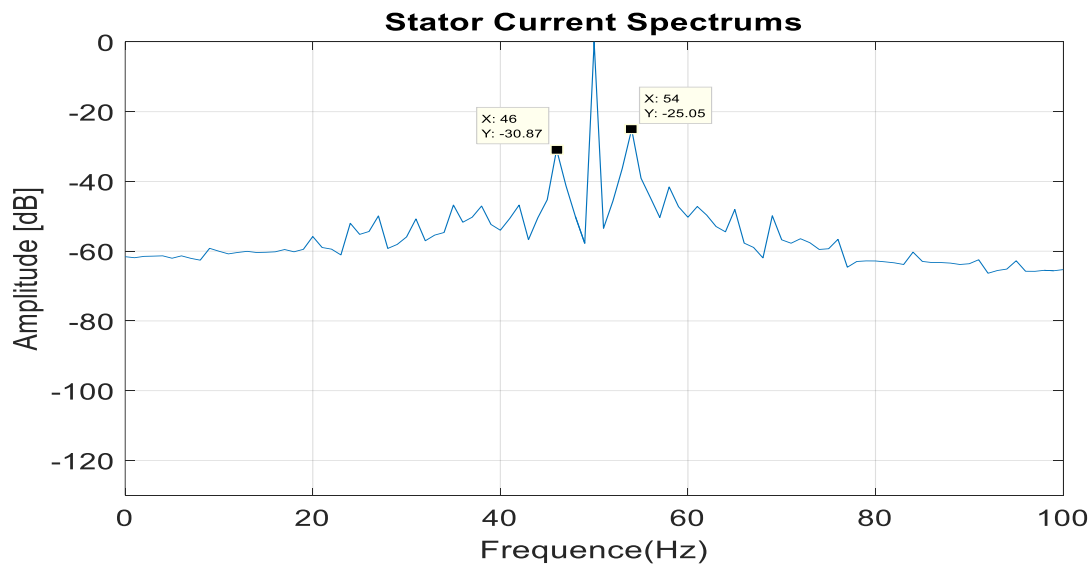


Figure III 13 : Spectres du courant statorique- machine avec trois barres cassées.

III 4.1/ Diagnostic de la MASDE par l'analyse fréquentielle de flux de fuite

Dans la section suivante, l'analyse des harmoniques du flux de fuite sera présentée. Les figures III 14 à III.16 présentent le spectre de flux de fuite pour la machine saine et avec des défauts de barres cassées. Il existe une distinction significative entre le flux de fuite et le courant statorique. On peut observer que le spectre du flux de fuite est plus riche en harmoniques que le courant.

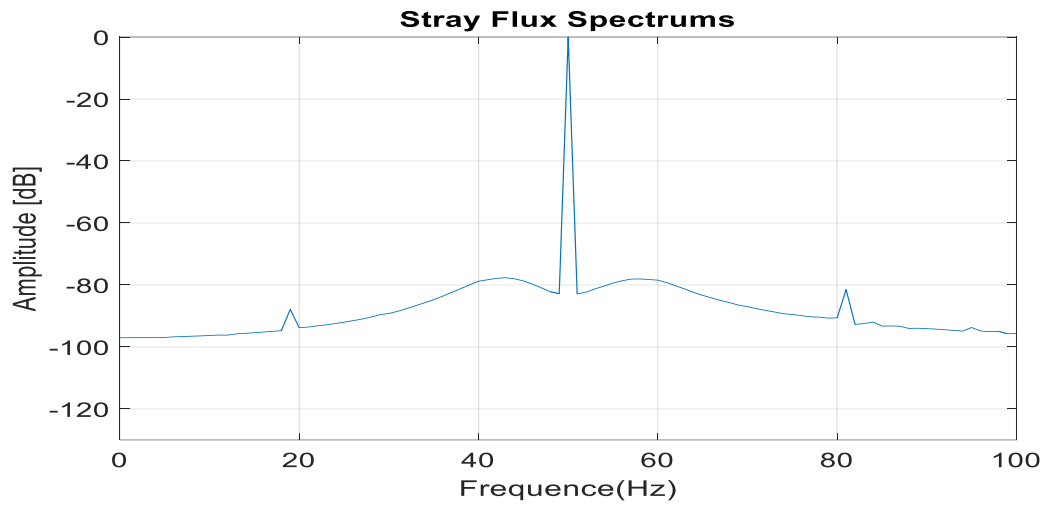


Figure III 14 : Spectres du flux de fuite pour la machine saine.

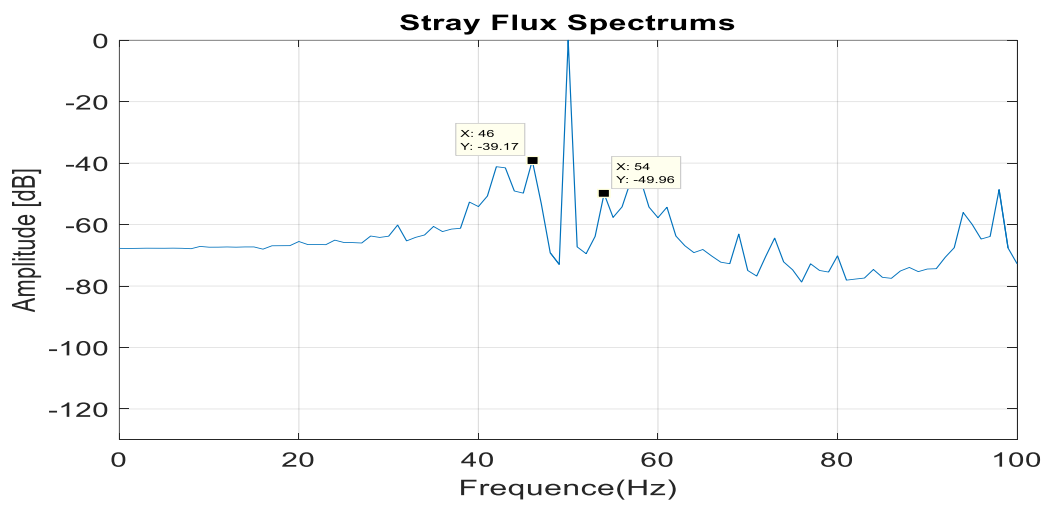


Figure III 15 : Spectres du flux de fuite de la machine avec une barre cassée.

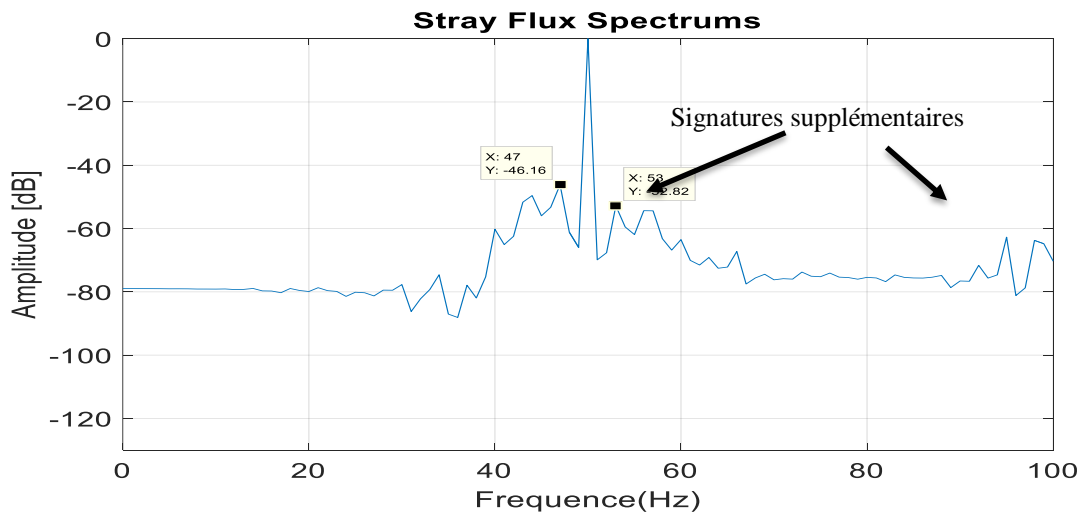


Figure III 16 : Spectres du flux de fuite de la machine avec trois barres cassées.

III 5/Conclusion

Dans ce chapitre, les signatures du flux magnétique de fuite ont été utilisées pour détecter le défaut de barre de rotor cassé dans la MASDE. Le modèle de la MASDE, par la méthode des éléments finis, est un outil puissant pour analyser le comportement de la machine. Les signatures de défaut des barres cassées à $f_s \pm 2g f_s$ du flux de fuite ont été examinées pour la bande latérales de 1^{ère} harmonique. La méthode proposée détecte bien le défaut de barre cassée. De plus, le courant du stator et le flux de fuite ont été comparés pour montrer l'avantage de l'analyse du flux de fuite pour le système de surveillance. Enfin, cette technique est rentable grâce au capteur de flux à faible coût nécessaire au processus de surveillance.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, nous avons abordé une problématique dans le domaine de la surveillance et du diagnostic des machines électriques, à savoir la détection des défauts dans la machine asynchrone double étoile en utilisant une méthode non invasive basé sur l'analyse du flux magnétique de fuite. La méthode des éléments finis a été utilisée pour modéliser cette technique, en raison de sa capacité à fournir des résultats proches de la réalité.

Les résultats obtenus ont démontré que l'analyse du flux de fuite constitue une technique efficace et non intrusive permettant la détection précoce des défauts, en particulier dans les situations où les méthodes classiques basées sur l'analyse du courant statorique montrent leurs limites. Ce travail a également mis en évidence l'importance de l'étape de modélisation dans l'amélioration de la précision du diagnostic.

L'analyse comparative entre les différentes techniques de surveillance a permis de souligner le potentiel des méthodes non invasives, telles que l'analyse du flux de fuite, comme alternative pour améliorer la fiabilité et la continuité de fonctionnement des machines électriques.

Enfin, ce travail ouvre des perspectives intéressantes, notamment le développement d'un système de diagnostic automatique, permettant une surveillance en temps réel. Des essais expérimentaux complémentaires sont également recommandés afin de valider l'efficacité de la méthode proposée et d'élargir son champ d'application aux différentes configurations industrielles.

Bibliographie

- [1] **Hadjouti** Yassine, **HAMBLI** Ali, « Modélisation de la machine asynchrone double étoile en vue du diagnostic du défaut de court-circuit entre spires statoriques », mémoire master, Université akli mohand oulhadj de bouira, 2017
- [2] **M. Ammar**, "Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones" Thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, 2012.
- [3] **B. Moussaoui**, **Y. Nekkouche**, « modélisation des moteurs asynchrones polyphasés dédiée au diagnostic de court-circuit entre spires, application aux moteurs penta phases et double étoile », Mémoire d'ingénieur en Université MMTO, Alger, 2008
- [4] **Baba 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, Algérie, Juin 2014
- [5] **Achachi** Farouq, **boussouar** Abderrahim, « Modélisation et commande d'un aérogénérateur éolien basée sur une génératrice synchrone double étoile à rotor bobiné », mémoire master , université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 2018
- [6] **Bouagga** Ahmed, Sami **Merabet** Seif El Islem, « Commande d'une machine Asynchrone à double stator par régulateur glissant », mémoire master, université kasdi merbah ourgla, 2019.
- [7] **Olivier Ondel** « Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone" Thèse de Doctorat » Ecole centrale de Lyon, France, 2006.
- [8] **MAGHRAOUI** Abde **Iwahab** et **DEBOUCHA** Abde **lhakim**, « Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage », UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA, année 2006
- [10] **Belhamdi Saad**, " Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [11] **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
- [12] **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.
- [13] : **HUBERT Razik**« Le Contenu Spectral Du Courant Absorbé Par La Machine Asynchrone En Cas de Défaillance » Faculté des Sciences, Nancy, CEDEX, juin 2002.

- [14] **Bessous Noureddine**, " Contribution au Diagnostic des Défaits dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation",Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider–Biskra,2017
- [18] **R.Casimir**. Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes.Thèsedoctorat. Ecole centrale de Lyon. Décembre 2003
- [15] **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.
- [16] **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
- [17] **A. Ibrahim**" Contribution au diagnostic de machines électromécaniques "Thèse de doctorat, université de saint Etienne Mars 2009.
- [18] **N .Bessous** " Contribution au diagnostic des machines asynchrones " .Mémoire de magister En Electrotechnique. Université Mentouri Constantine 2007.
- [19] **Roland casimir** ,92 « diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes », 2003.
- [20] **AIT MIHOUB** Mohamed oulhocine, « METHODE GLOBALE DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES A CAGE D'ÉCUREUIL », mémoire master université m'sila,2015
- [21] **G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter**, and H. Dhirani, "Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair: Second Edition," 125 Electr. Insul. Rotating Mach. Des. Eval. Aging, Testing, Repair Second Ed., vol. 9781118057, pp. 1–643, 2014.
- [22] **ABB Motors**, "ABB Ability TM Smart Sensor," 2017. [https://new.abb.com/motors/generators/service/advancedservices/smart %0Asensor/smart-sensor-for-motors](https://new.abb.com/motors/generators/service/advancedservices/smart%0Asensor/smart-sensor-for-motors).
- [23] **CEBAN, Andrian**. Méthode globale de diagnostic des machines électriques. 2012. Thèse de doctorat. Artois.
- [24] **Y. Park et al.**, "Stray flux monitoring for reliable detection of rotor faults under the influence of rotor axial air ducts," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 66, no. 10, pp. 7561–7570, 2019.
- [25] **S.-B. Lee, J. Shin, Y. Park, H. Kim**, and **J. Kim**, "Reliable Flux based Detection of Induction Motor Rotor Faults from the 5th Rotor Rotational Frequency Sideband,"

IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 0046, no. c, pp. 1–1, 2020

[26] A. **Ceban**, R. **Pusca**, and R. Romary, “Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 5, pp. 2082–2093, 2012,

[27] C. **Jiang**, S. **Li**, and T. G. **Habetler**, “A review of condition monitoring of induction motors based on stray flux,” 2017 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2017, vol. 2017-Janua, pp. 5424–5430, 2017, doi: 10.1109/ECCE.2017.8096907.

[28] I. **Zamudio-Ramírez**, R. A. **Osornio-Ríos**, J. A. **Antonino-Daviu**, and A. **Quijano Lopez**, “Smart-sensor for the automatic detection of electromechanical faults in induction motors based on the transient stray flux analysis,” Sensors (Switzerland), vol. 20, no. 5, 2020

[29] R. Romary, R. **Pusca**, J. P. **Lecoïnte**, and J. F. **Brudny**, “Electrical machines fault diagnosis by stray flux analysis,” in Proceedings - 2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, WEMDCD 2013, 2013, pp. 247–256, doi: 10.1109/WEMDCD.2013.6525184.

[30] I. **Zamudio-Ramirez**, J. A. **Antonino-Daviu**, R. A. **Osornio-Rios**, R. De **Jesus Romero Troncoso**, and H. **Razik**, “Detection of Winding Asymmetries in Wound-Rotor Induction Motors via Transient Analysis of the External Magnetic Field,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 67, no. 6, pp. 5050–5059, 2020,

[31] T. **Goktas**, M. **Zafarani**, K. W. Lee, B. Akin, and T. **Sculley**, “Comprehensive Analysis of Magnet Defect Fault Monitoring Through Leakage Flux,” IEEE Trans. Magn., vol. 53, no. 4, 2017.126

[32] **Kokko**, V., 2003. Condition Monitoring of Squirrel-cage Motors by Axial Magnetic Flux Measurements. Acta Universitatis Ouluensis: Technica, University of Oulu. URL: <https://books.google.fr/books?id=gS4OMwAACAAJ>.

[33] G. **Mirzaeva** and K. **Saad**, “Advanced diagnosis of rotor faults and eccentricity in induction motors based on internal flux measurement,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 54, no. 3, pp. 2981–2991, May/Jun. 2018.

[34] Y. **Park**, H. **Choi**, S. **Bin Lee**, and K. N. **Gyftakis**, “Search Coil Based Detection of Nonadjacent Rotor Bar Damage in Squirrel Cage Induction Motors,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 56, no. 5, pp. 4748–4757, 2020

- [35] **Ghogga Adel**, Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée : Modèle Dédié à la Détection des Défauts, Université de Batna, année 2005.
- [36].**M. Drif** and **A. J. M. Cardoso** "Airgap-Eccentricity Fault Diagnosis, in Three-Phase Induction motors, by the Complex Apparent Power Signature Analysis", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.55, no.3, March 2008.
- [37] **Ho, Siu Lau**, and **W. N. Fu**. "Review and future application of finite element methods in induction motors." Electric machines and power system 26.2 (1998): 111-125.
- [38] **A. Assam**, « Identification des Machines Asynchrones en Vue de Leurs diagnostics », Thèse de magister de l'Université de Sétif, soutenue 2010.
- [39] **S. Mouellef**, « Contribution A L'étude D'une Machine A Réductance Variable : Conception, Modélisation & Simulation D'une MRVDS 6-4», Thèse de magister, université de Mentouri, Constantine, 2008.
- [40] **T. Tudorache**, **L. Melcescu** and **V. Petre**: "FEM optimal design of energy efficient induction machines", Advances in Electrical and Computer Engineering, Volume 9, Number 2, 2009.
- [41] **Lakhdari Meftah**, « Simulation et commande de la machine asynchrone double étoile », thèse doctorat, Université Ferhat Abbas-Sétif-1, 2014.
- [42] **Halemnoura**, Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Éléments Finis, Thèse de doctorat, l'Université de biskra, soutenue 2010.
- [43] **ZORIG, Assam**. Contribution à la détection des défauts et au diagnostic dans les machines électriques par l'exploration des données. PhD Thesis. Université de M'Sila
- [44] **Louafi boumedyen ,Mansori toufik**, " Diagnostic des défauts au rotor dans la machine asynchrone à double stator", mémoire de master, Université de M'sila-Mohamed Boudiaf.

Résumé

Les machines asynchrones sont les machines les plus utilisées dans tous les secteurs industriels en raison de leur durabilité, robustesse, simplicité de conception et de leur coût réduit. cependant, la détection des défauts dans ces machines reste un sujet essentiel de recherche et d'intérêt industriel à ce jour.

Notre étude se concentre sur l'analyse des machines asynchrones double stator en présence des défauts. Nous avons développé un modèle simplifié à éléments finis, utilisant le logiciel Flux2D®, qui permet de simuler tous les défauts dans ces machines. Enfin, nous avons proposé une méthode de diagnostic basée sur l'analyse spectrale de flux de fuite, afin de détecter notamment les défauts des barres cassées.

Mots clés : machine asynchrone, diagnostic, flux de fuite, modélisation, défauts, FFT.

ملخص

تُعدّ الآلات غير المتزامنة من أكثر الآلات استخدامًا في جميع القطاعات الصناعية، وذلك بفضل متانتها وصلابتها وبساطتها تصميمها وتكلفتها المنخفضة. ومع ذلك، لا تزال عملية كشف الأعطال في هذه الآلات موضوعًا أساسيًا للبحث وموضع اهتمام صناعي حتى يومنا هذا.

تركز دراستنا على تحليل الآلات غير المتزامنة ذات الجزء الثابت المزدوج في حالة وجود أعطال. وقد طورنا نموذجًا مبسطًا، يتيح محاكاة جميع الأعطال في هذه الآلات. وأخيرًا، باستخدام برنامج Flux2D® بواسطة برنامج (FEM) باستخدام طريقة العناصر المحددة، اقترحنا طريقة للتشخيص تعتمد على التحليل الطيفي للفيض المتسرب، بهدف الكشف عن أعطال مثل القضبان المكسورة.

الكلمات المفتاحية: آلة غير متزامنة، التشخيص، تدفق التسرب، النمذجة، الأعطال، تحويل فورييه السريع.

Abstract

Asynchronous machines are the most widely used machines across all industrial sectors due to their durability, robustness, simple design, and low cost. However, fault detection in these machines remains a key subject of research and industrial interest to this day.

Our study focuses on the analysis of double-stator asynchronous machines in the presence of faults. We developed a simplified finite element model using the Flux2D® software, which allows for the simulation of all types of faults in these machines. Finally, we proposed a diagnostic method based on the spectral analysis of stray flux, specifically aimed at detecting broken bar faults

Keywords : asynchrones machine, diagnoses, leakage flux, Mödling, faults, , FFT