الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معـــــــــهد المـــــناجم
Institut des Mines
قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا
Département Mines Et Géotechnologie

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : électromécanique

Option : Maintenance industrielle

Diagnostic des défauts des machines électriques par l'analyse des signaux

Par

BOUGROUZ ASMA

Devant le jury :

Louafi Messaoud	**Président**	**Pr**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
ZaamoucheFares	**Encadreur**	**MC A**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
RechacheAbdelkrim	**Examinateur**	**MC A**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**

Année universitaire 2024/2025

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Larbi Tebessi – Tébessa
Institut des Mines
Département mines et géotechnologie

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة العربي التبسي – تبسة
معهد المناجم

Tébessa le: 05/06/2025 قسم: 05/06/2025

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :
1- BOUGROUZ ASMA

Niveau : Master II Option : Maintenance Industrielle

Thème : Diagnostic des défauts des machines électriques par l'analyse des signaux

Nom et prénom de l'encadreur : Dr. ZAAMOUCHE Fares

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Introduction générale	
Chapitre I : Généralités sur les machines électriques	
Chapitre II : Les différents types des défauts électriques et mécaniques	
Chapitre III : Méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques	
Chapitre IV : Étude par simulation sous MATLAB/Simulink	
Conclusion Générale	

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي – تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة).....نوقرو.....أسماء.....الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : ...طالبة.....

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم 406510838 ..... و الصادرة بتاريخ 2023/09/30 .....

المسجل بمعهد ...العلوم.....معهد الملاحة.....قسم الإلكترونيك تخصص صيانة صناعية

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

Diagnostic des defauts des machines electriques par l'analyse des signaux

أصرح بشرفي أني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 01/06/2025

إمضاء المعني (ة)

01 جوان 2025
أقر وأصدق على صحة
الإمضاء
تحريرا بالورقاء في

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
عون الخزانة الاقتصادية
إمضاء : بوسنة صالح

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je dédie ce travail, fruit de mes efforts et de longues années de persévérance,
aux personnes les plus chères à mon cœur :
À ma tendre mère Naïma, source inépuisable d'amour et de soutien,
À mon cher père Bougrouz Lamine, Je le dédie également à ma chère famille,
qui a été pour moi un soutien et un appui dans les moments de détresse
comme dans les instants de joie. qui m'a appris la patience et la détermination,
À mon frère bien-aimé Mohamed, mon soutien en toutes circonstances,
À mes chères sœurs Sarah**, **Aya** et **Retaj**,
qui ont rempli ma vie d'amour et de chaleur. Et toute ma reconnaissance et mon amour à Aws et Taym, les enfants de ma sœur.

À mes merveilleuses amies : Sana Tebba, Chahinaz et Chaïma,
compagnonnes de route dans les moments difficiles comme dans les plus beaux,
votre présence a été une bénédiction inestimable.

À vous tous, j'offre cet accomplissement avec toute ma fierté et ma gratitude,
car il est le fruit de votre amour et de votre soutien constants.

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah, l'unique, qui m'a offert le courage, la force, la volonté et le moral nécessaires, et qui m'a accompagné tout au long de mes études.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le Docteur [Zaamouch Farès, mon encadreur, pour ses conseils pertinents, ses orientations sages, sa patience et sa vigilance. Ses remarques ont grandement facilité la réalisation de ce travail.

Je remercie également tous les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je remercie vivement toutes les personnes qui nous ont aidés, de près ou de loin, à accomplir ce travail.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance à tous mes amis et collègues.

Résumé

Dans un contexte industriel où la fiabilité et la disponibilité des équipements électriques sont devenues des enjeux stratégiques, la surveillance et le diagnostic des machines électriques — notamment les moteurs asynchrones — occupent une place centrale. Ces machines, largement utilisées pour leur robustesse et leur efficacité, sont néanmoins exposées à divers types de défaillances électriques et mécaniques susceptibles de compromettre leur bon fonctionnement.Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en proposant une étude approfondie du diagnostic des défauts dans les machines électriques à partir de l'analyse des signaux. L'objectif est de développer une méthodologie de détection et d'interprétation des défauts basée sur la modélisation, la simulation et l'analyse des réponses dynamiques de la machine.Après une introduction générale aux machines électriques et à leurs principaux composants, nous avons identifié et classifié les défauts courants — surtensions, déséquilibres de phase, courts-circuits partiels, défaillances rotor-stator, etc. Ensuite, nous avons présenté les différentes techniques de diagnostic, allant des approches conventionnelles (analyse fréquentielle, spectrale) jusqu'aux méthodes avancées reposant sur l'intelligence artificielle et le traitement de signal.

La partie pratique du travail a consisté à simuler le comportement d'un moteur asynchrone sain puis défectueux sous MATLAB/Simulink. Divers scénarios de panne ont été modélisés, et leurs effets ont été analysés à travers les signaux de courant, de couple et de vitesse. Ces simulations ont permis de faire ressortir les signatures caractéristiques de chaque défaut, fournissant ainsi des bases solides pour un diagnostic fiable et prédictif.

Ce travail met en lumière la pertinence des outils numériques dans le domaine du diagnostic industriel et ouvre la voie à des perspectives prometteuses en matière de maintenance conditionnelle et prévisionnelle

Summary

In an industrial context where the reliability and availability of electrical equipment have become strategic issues, the monitoring and diagnosis of electrical machines — particularly asynchronous motors — play a central role. These machines, widely used for their robustness and efficiency, are nevertheless exposed to various types of electrical and mechanical faults that can compromise their proper functioning.

This thesis addresses this challenge by offering an in-depth study of fault diagnosis in electrical machines based on signal analysis. The objective is to develop a methodology for detecting and interpreting faults through modeling, simulation, and analysis of the machine's dynamic responses.

Following a general introduction to electrical machines and their main components, we identified and classified common faults — overvoltages, phase imbalances, partial short circuits, rotor-stator failures, etc. We then presented various diagnostic techniques, ranging from conventional approaches (frequency and spectral analysis) to advanced methods based on artificial intelligence and signal processing.

The practical part of this work involved simulating the behavior of a healthy and faulty asynchronous motor using MATLAB/Simulink. Various fault scenarios were modeled, and their effects were analyzed through current, torque, and speed signals. These simulations helped to highlight the characteristic signatures of each fault, thus providing a solid foundation for reliable and predictive diagnostics.

This study underscores the relevance of digital tools in industrial diagnostics and paves the way for promising prospects in condition-based and predictive maintenance.

Sommaire

Chapitre I : Généralités sur les machines électriques

Introduction générale ……..……..……..1
I.1Introduction……..……..…….....4
I.2.principes fonctionnement des machines électriques 4
I.3 Les composant d'une machine électrique ……..…5
I.4Les types de machine électriques …….....6
1.Les moteurs électriques……..……...…….....6
a. Moteur électrique monophasé ou triphasé …….....6
b. Moteur à courant continu (CC) ……....8
C. Moteur à courant alternatif (AC) …….....9
D. Les générateurs électriques …….....12
1. Développement Historique…….....12
2.type des Les générateurs électriques 13
E .Les transformateurs …….....13
1. Symboles et schémas d'un transformateur électrique …….....14
2 .Types de transformateurs ……...…14
I.5. Application des machines électriques ……..…….....16
a. Industrie et production…….…….....17
b. Transport…….…….....17
c. Électroménager…….…….....17
d. Production et distribution d'énergie…….....17
e. Robotique et automatisation……..……...…….....18
f. Énergies renouvelables…… ..…….....18
g. Applications médicales…..……..…….....18
I .6. Conclusion ……..……...……...…….....…18

Chapitre II : Les différents types des défauts électriques et mécaniques

II.1.Introduction…….....20
II.2. les différents types des défauts électriques dans les machines électriques……...20
a.La surintensité par surcharge électrique…….....22
1. Comment reconnaître une surcharge électrique .. ……..……..23
2. Quelles conséquences pour une surcharge électrique ?.....23
b .La surintensité par court-circuit…….....25
1.Classification des courts-circuits selon leur nature et gravité….....25
c. Comment reconnaître un court-circuit…….....27
d.Comment éviter un court-circuit …….....27
3. La surtension…….....28
a. Comment reconnaître une surtension …….....29

b.Quelles conséquences pour une surtension ……29
4.La baisse ou le manque de tension…….....30
a.Comment reconnaître une baisse de tension ……31
b.Quelles conséquences pour une baisse de tension……32
5.La fuite électrique…….....32
a .Comment reconnaître une fuite électrique 33
b.Quelles conséquences pour une fuite électrique …….....34
II.3.les diffèrent types des défauts mécaniques dans les machines électriques……...……..34
II.3.a. Défauts liés au rotor ……...…….....34
1.les principaux types de défauts rotoriques ……35
a. Rupture de barres ……...…….....35
b.Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit…….....36
c. Excentricité du rotor…….....……..…..38
d.Défauts ou usures des roulements……..……....…….....…..40
e.desalignement…….42
II.3.b Défauts liés au stator……44
1. Types de défauts statoriques …….....……45
2. Causes des défauts statoriques……45
II .4.Conclusion……...45

Chapitre III : Méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

III.1.Introduction 46
2.Analyse des signaux vibratoires……...……....46
3.Analyse du courant statoirique…….…….....49
4.Analyse du champ magnétique de dispersion.……...……..51
5.Méthodes acoustiques……...52
6.Tests électriques statiques et dynamiques……...54
a.Tests électriques statiques……..…….....54
b. Tests électriques dynamiques……..……...56
7.Méthodes Visuelles de Diagnostic…….....……...57
8. Méthodes Thermiques…….……...58
9. Méthodes Ultrasonores……..…….58
10. Méthodes de Diagnostic par Analyse d'Harmoniques.....59
11.Méthodes par Contrôle Non Destructif (CND)…….....59
12. Méthodes de Maintenance Prédictive et Diagnostic Avancé…….……...60
13.Technique avancer bases sur l'intelligence artificielle……..……60
III.13. Conclusion…….……...…61

Chapitre IV : Étude par simulation sous MATLAB/Simulink

1-Introduction ……..……..……..…63
2-Description de la machine asynchrone……..…63
3-Hypothèses simplificatrices ……64
4-Mise en équation de la MAS ……..…..64
4.1Equations électriques ……..……..…….65
4.2Equationsmagnétiques…… ..……66
4.3Equation mécanique ……..…….66
4.4Transformation de PARK ……..……..67
4.5Modèle de Park de la machine asynchrone triphasé ……..…..69
4.6.1Equations électriques……..……69
4.6.2Equationsmagnétique…….……69
4.6.3Equations mécanique……...……..69
4.7Choix du référentiel biphasé …….……70
4.7.1Référentiel lié au stator (α, β) …… ……70
4.7.2 Référentiel lié au champ tournant (d, q) …….……70
IV.5. Simulation……..71
1. Introduction ……71
2. Présentation du logiciel de travail……...72
3. Simulation de la machine asynchrone…….72
a. Cas d'une machine saine……..…….72
b. Cas pour un défaut de déséquilibre d'alimentation sur une phase……..76
c. Cas pour un défaut de déséquilibre d'alimentation sur deux phase…..……80
d. Cas pour un défaut suite à une baisse de fréquence……..……84
e. Cas pour un défaut de court circuit entre spires…….……87
f. Cas pour un défaut rotorique……..……91
6.Paramètres de la machine asynchrone employée ……94
7. Conclusion……95
Conclusion Générale ……96
Bibliographie……99

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I .1 *:* Moteur Électrique Monophasé 220v 0.55kW 1000tr/min - MMD80B6 Bride B3.....…….. 7

Figure I.2 : Moteur Électrique Triphasé 230/400V 2.2kW 1500tr/min – MH1100L4B3 Bride B38 .....……8

Figure I.3 : Classification des machines électriques ……..11

Figure I.4 : Générateur électrique américain de la General Electric …….....12

Figure I.5 : Transformateur…….....13

Figure I.6 : Schéma électrique d'un transformateur réel…….14

Chapitre II

Figure II .1 : classification des défauts selon leurs origines ……..….20

Figure II .2 : la surintensité par surcharge électrique…….....22

Figure II.3 : La surintensité par court-circuite…….....25

Figure II .4: La surtension……...29

Figure II.5 : La fuite électrique……33

Figure II. 6 : rupture de barres…….……35

Figure II.**7**: Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit.....…...36

Figure II.8 : Différents types d'excentricités……...38

Chapitre III

Figure III.1 : Technique Analyse des signaux vibratoires……...46

Figure III.2 : Numérisation d'un signal analogique…….47

Figure III.3 :Analyse spectrale du courant statorique ……50

Figure III.4 : Mesure du champ magnétique sur une paire de bobines dans un dispositif de Helmholtz……..…51

Figure III.5 : Test, bilan et contrôle acoustique……..….53

Figure III.6 : Tests électriques statiques et dynamiques……54

Figure III.7 : L'intelligence artificielle……60

Chapitre IV

Figure (IV.1) : représentation de la machine asynchrone avec le stator et le rotor…….64

.

Figure (IV-2) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée…….....65

Figure (IV-3) : représentation schématique de modèle triphasé réel et modèle biphasé équivalente de la machine asynchrone……68

Figure (IV. 4) : Courant statorique de la phase (a) Ia……..73

Figure (IV. 5) : les courants statoriques Iabc du MAS…….73

Figure (IV. 6) : couple électromagnétique du MAS……73

Figure (IV. 7) : la vitesse de rotation du MAS……73

Figure (IV. 8) : la caractéristique mécanique du MAS, Ce=f(w)……74

Figure (IV. 9) : Courant statorique de la phase (a) Ia…….76

Figure (IV. 10) : les courants statoriques Iabc du MAS……..77
Figure (IV. 11) : couple électromagnétique du MAS……77
Figure (IV.12) : Zoom sur le couple électromagnétique……77
Figure (IV. 13) : la vitesse de rotation du MAS…….....77
Figure (IV. 14) : la caractéristique mécanique du MAS, Ce=f(w)……78
Figure (IV. 15) : Courant statorique de la phase (a) Ia……80
Figure(IV.16) : les courants statoriques Iabc du MAS……....80
Figure (IV.17) : couple électromagnétique du MAS……...81
Figure (IV.18) : la vitesse de rotation du MAS……..81
Figure (IV. 19) : la caractéristique mécanique du MAS, Ce=f(w)…….....81
Figure (IV. 20) : Courant statorique de la phase (a) Ia…….....84
Figure (IV. 21) : les courants statoriques Iabc du MAS…….....84
Figure (IV. 22) : couple électromagnétique du MAS……..85
Figure(IV.23) : la vitesse de rotation du MAS……....85
Figure (IV. 24) : la caractéristique mécanique du MAS, Ce=f(w)……..85
Figure (IV. 25) : Courant statorique de la phase (a) Ia……88
Figure (IV. 26) : les courants statoriquesIabc du MAS……...88
Figure (IV. 27) : couple électromagnétique du MAS……..88
Figure(IV.28) : Zoom sur le couple électromagnétique……....88
Figure (IV. 29) : la vitesse de rotation du MAS ……....89
Figure (IV. 30) : la caractéristique mécanique du MAS, Ce=f(w)……..89
Figure(IV.31) : Courant statorique de la phase (a) Ia……..91
Figure (IV. 32) : les courants statoriques Iabc du MAS……..91

Figure (IV. 33) : couple électromagnétique du MAS……92
Figure (IV. 34) : la vitesse de rotation du MAS……..92
Figure(IV.35) : la caractéristique mécanique du MAS, Ce=f(w)……92

Liste des Tableaux

II .1Calibres des disjoncteurs selon les circuits……...…24
III .1Comparaison des méthodes…….…….……..61

Notations et symboles utilisés

Rs :…… résistance du stator

Rr :…… résistance du rotor

Ls :…… inductance propre du stator

Lr :…… inductance propre du rotor

M :……. inductance mutuelle entre le stator et le rotor

ia, ib, ic :…… courants des phases A, B et C du stator

iα, iβ :…… courants dans le repère fixe (α, β)

id, iq : ……courants dans le repère tournant (d, q)

ψ :……. flux magnétique

ψ_d, ψ_q : …… composantes du flux magnétique selon les axes d et q

va, v_b, v_c : ……tensions des phases A, B et C du stator

vd, vq : ……tensions dans le repère (d, q)

P : ……nombre de paires de pôles

θ :……..angle électrique

ω :…….vitesse angulaire du rotor

ωs :……. ..vitesse synchrone (vitesse du champ tournant)

J :……..moment d'inertie des parties tournantes

Ce : ……..couple électromagnétique

Cr : ……couple résistant (charge mécanique)

f :…….. ..fréquence d'alimentation du réseau

s : ……glissement (slip)

ns : ……..vitesse synchrone en tr/min

a, b, c : ……enroulements du rotor modélisés en triphasé

A, B, C :…….. enroulements du stator (triphasé)

P (matrice) :…… matrice de transformation de Park

Rs, Rr (matrices) : ……..matrices de résistances statorique et rotorique

L (matrice) :…….. matrice d'inductances

S : ……..variable de Laplace, utilisée dans l'analyse fréquentielle

Introduction générale

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, les moteurs asynchrones se sont imposés comme des éléments incontournables dans le domaine des entraînements électromécaniques. Représentant près de 80 % des moteurs électriques en usage industriel, leur popularité s'explique par une combinaison de facteurs techniqueset économiques, notamment leur conception simple, leur coût réduit, leur fiabilité élevée, ainsi que la facilité de mise en service et d'entretien. Fonctionnant généralement sous une tension et une fréquence constantes lorsqu'ils sont directement connectés au réseau, ces moteurs bénéficient aujourd'hui des avancées de l'électronique de puissance. En effet, l'utilisation d'onduleurs à fréquence variable permet non seulement un démarrage progressif et maîtrisé, mais aussi un contrôle précis de la vitesse sur une large plage de fonctionnement, ouvrant ainsi la voie à une adaptabilité accrue dans les applications industrielles modernes.

Par ailleurs, le moteur asynchrone à cage d'écureuil se distingue par un champ d'application particulièrement étendu, ce qui en fait un choix privilégié dans de nombreux secteurs stratégiques. Parmi les domaines d'utilisation les plus notables, on peut citer : la traction ferroviaire, la propulsion électrique maritime, les systèmes de pompage, la ventilation industrielle, les machines-outils, ainsi que les installations du secteur nucléaire.

En outre, la présence de divers dysfonctionnements peut compromettre gravement la sécurité, la fiabilité et la disponibilité des systèmes automatisés. Dès lors, la conception de mécanismes de détection et de surveillance devient un enjeu central dans l'ingénierie des systèmes modernes. Grâce à la diversité de ses approches et à la richesse de ses outils méthodologiques, le diagnostic s'impose aujourd'hui comme une composante essentielle de l'automatique contemporaine

Il convient de rappeler que de nombreuses études et recherches ont été consacrées, au fil des années, à l'identification des méthodes de détection des pannes et défaillances, ainsi qu'à l'analyse de leurs relations de cause à effet. Ces travaux visent essentiellement à renforcer la fiabilité des moteurs asynchrones et à prolonger leur durée de vie opérationnelle.

Position du problème :

Compte tenu de la difficulté technico-économique de procéder à une expérimentation exhaustive envisageant et testant toutes les éventuelles possibilités dépannes de moteurs asynchrones, il serait judicieux de mettre en œuvre un outil dissimulation qui offrirait l'avantage de permettre une combinaison entre diverses hypothétiques cas de figures auxquelles on pourrait se heurter lors de l'utilisation d'un moteur asynchrone.

A cet effet, notre mémoire est reparti comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un aperçu général et complet des machines électriques, en examinant leurs classifications de base, comprenant les moteurs, les générateurs et les transformateurs. Nous avons également expliqué les principes physiques et techniques qui sous-tendent leur fonctionnement, en mettant l'accent sur l'interaction entre les champs magnétiques et les courants électriques. De plus, nous avons souligné les rôles variés que jouent ces machines dans les applications industrielles et quotidiennes, en insistant sur leur importance dans la conversion et le contrôle de l'énergie électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons traité les différents types de défauts pouvant survenir dans les machines électriques, en les classant en deux grandes catégories : les défauts électriques et les défauts mécaniques. Nous avons présenté brièvement les causes principales de chaque type de défaut ainsi que

leurs effets sur le fonctionnement de la machine, tout en donnant quelques exemples concrets.

Dans le troisième chapitre, nous abordons les méthodes et techniques de diagnostic des défauts dans les machines électriques. Ce chapitre présente les outils de détection, les stratégies d'analyse des signaux et les approches utilisées pour identifier précisément les anomalies, en s'appuyant sur des cas pratiques et des études récentes.

Dans le quatrième chapitre, nous avons choisi d'étudier une machine asynchrone (MAS) en raison de sa large utilisation dans les applications industrielles et de son importance technique. Un modèle de la machine a été réalisé à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, où nous avons simulé son comportement en état normal ainsi qu'en présence de différents types de défauts.Cette étude vise à analyser les signaux temporels extraits de la simulation, notamment les courants triphasés (Iabc), la vitesse angulaire (ω) et le couple électromagnétique (Ce), afin de comparer le comportement de la machine en bon état à celui en conditions défectueuses. Cette analyse permet de mieux comprendre l'impact de chaque type de défaut sur les performances de la machine, et constitue une étape clé dans le diagnostic des défauts basé sur l'analyse des signaux.

Nous avons présenté les résultats de simulation du modèle établi : moteur sain et avec défauts.
Nous terminerons ce travail par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude et par une présentation des perspectives de recherche pouvant être envisagées.

Chapitre. I : Généralités sur les machines électriques

I. 1.Introduction

Une machine électrique, est un appareil électromécanique qui utilise l'électromagnétisme pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, ou vice versa. Ce processus est réversible, permettant à la machine de produire de l'électricité [1].

Les machines électriques sont classées en fonction de leur fonction en tant que générateurs ou moteurs1. Cependant, étant donné que toutes les machines électriques peuvent fonctionner comme moteur ou générateur dans les quatre quadrants du niveau de vitesse de couple, la distinction est généralement faite en fonction de l'utilisation finale de la machine.[1]

I.2.principes fonctionnement des machines électriques

Le fonctionnement d'une machine électrique repose sur les principes de l'électromagnétisme, où l'interaction des courants électriques et des champs magnétiques produit un travail[11]. Ces machines peuvent être classées en machines génératrices transformant l'énergie mécanique en énergie électrique et en moteurs transformant l'énergie électrique en énergie mécanique [11].

Principes de base

- Action-réaction: Lorsqu'un courant électrique traverse une bobine conductrice placée dans un champ magnétique, une force est créée, poussant le conducteur dans une direction spécifique [12]

-Induction d'un courant électrique**:** Le déplacement relatif d'un circuit conducteur et d'un champ magnétique induit un courant électrique dans le circuit[11]

Composants principaux

- Stator: La partie fixe du moteur, contenant les bobines conductrice [12]. Dans une génératrice, le stator produit une tension induite par le champ magnétique variable produit par le rotor en rotation[13].

- Rotor: La partie mobile montée sur un axe, permettant sa rotation à l'intérieur du stator[12].

Les courants rotoriques produisent un champ magnétique qui réagit mécaniquement avec le champ inducteur du stator, produisant un couple de rotation[13]

I.3 Les composant d'une machine électrique :

Un moteur électrique est un dispositif essentiel utilisé dans de nombreuses applications, des véhicules électriques aux équipements domestiques et aux machines industrielles [17].

Il convertit l'énergie électrique en énergie mécanique en utilisant l'attraction des pôles d'un aimant ou d'un électroaimant [17]. Les principaux composants d'un moteur électrique comprennent [17]:

- Stator: La partie fixe du moteur, composée d'enroulements en cuivre autour d'un noyau en fer laminé. Le courant électrique traversant ces enroulements génère un champ magnétique statique[17]

- **Rotor:** La partie mobile du moteur, également constituée d'un noyau en fer laminé. Il contient des aimants permanents ou des bobines alimentées en courant continu. Le rotor tourne grâce à l'interaction avec le champ magnétique du stator, fournissant ainsi la puissance mécanique[18].

-Collecteur (pour moteurs à courant continu): Transfère l'énergie électrique aux bobines du rotor, créant un champ magnétique rotatif qui entraîne le mouvement[17].

- **Commutateur (pour moteurs à courant alternatif):** Inverse périodiquement la polarité des bobines, créant un champ magnétique rotatif[17].

- **Roulements:** Soutiennent et guident le rotor pour minimiser les frottements, réduisant ainsi les pertes d'énergie et assurant l'alignement des composants..

- **Boîtier:** L'enveloppe externe qui protège les composants internes et permet de fixer le moteur à diverses applications.

- Enroulements: Bobines en cuivre situées sur le stator qui créent un champ magnétique statique lorsqu'un courant électrique les traverse[17].

- Arbre: Transmet le mouvement de rotation.

I.4Les types de machine électriques

1. Les moteurs électriques

a. Moteur électrique monophasé ou triphasé

Le moteur électrique, possède une structure simple mais efficace. Composé d'un enroulement de fils conducteurs ainsi que d'une paire essentielle **:** le stator et le rotor**,** son rôle principal est la conversion de l'énergie électrique en mouvement ou énergie mécanique. En fonction des besoins spécifiques, ce type de moteur peut être alimenté par deux types courants distincts : soit monophasé soit triphasé.[2]

-Moteur monophasé 220V

Un moteur à tension monophasée de 220V est couramment utilisé dans les résidences privées. Ce type de moteur fonctionne avec un courant électrique qui ne possède qu'une seule phase**,** ce qui le rend parfaitement adapté pour les appareils nécessitant une alimentation inférieure ou égale à 230V.

Les moteurs monophasés sont une catégorie de moteurs électriques qui fonctionnent sur un seul courant alternatif (AC)**,** Comme leur nom l'indique, ils fonctionnent avec une seule phase d'alimentation. Voici quelques points importants à noter [2]:

- **Fonctionnement** : Le principe de fonctionnement des moteurs monophasés repose sur le champ magnétique produit par le courant alternatif. Ce champ magnétique fait tourner l'arbre du moteur, générant ainsi la force motrice[2].
- **Utilisation** : En raison de leur simplicité et facilité d'utilisation, les moteurs monophasés sont largement utilisés dans les appareils ménagers tels que les climatiseurs, réfrigérateurs et machines à laver[2].
- **Avantages** : Les principaux avantages des moteurs monophasés comprennent leur coût relativement faible comparativement aux autres types de moteur électrique et leurs moindres besoins en entretien grâce à leur structure simplifiée [2].



Figure I .1 : Moteur Électrique Monophasé 220v 0.55kW 1000tr/min - MMD80B6 Bride B3

- **Moteur triphasé 380V**

Les moteurs triphasés 380V sont principalement utilisés dans le domaine industriel. Comme son nom l'indique, “tri" signifie trois donc ce courant

électrique fonctionne en trois phases distinctes**.** Cette caractéristique permet d'alimenter de grandes machines, souvent présentes dans les industries du secteur secondaire qui nécessitent au moins 400V pour leur fonctionnement. En raison de leur capacité à fournir un haut niveau de puissance électrique, les moteurs triphasés sont essentiellement utilisés dans le cadre des infrastructures et des équipements industriels requérant une forte intensité énergétique. Par conséquent, leur présence est plutôt rare dans les installations domestiques.[2] La production d'énergie par ces moteurs électriques triphasés est basée sur le principe de l'électromagnétisme. Ils diffèrent des moteurs monophasés par leur utilisation detrois phases, ce qui permet une transmission plus importante de la puissance électrique grâce à leur configuration spécifique.[2]



Figure I.2 : Moteur Électrique Triphasé 230/400v 2.2kW 1500tr/min - MH1100L4B3 Bride B3

b. Moteur à courant continu (CC)

Les moteurs à courant continu sont une catégorie de moteurs électriques qui fonctionnent sur la base du principe d'induction magnétique. Ces différents types de moteurs sont largement utilisés pour diverses applications nécessitant un contrôle précis de la vitesse et du couple.

Leur fonctionnement repose sur l'interaction entre un champ magnétique fixe**,** généré par des aimants permanents ou des bobines alimentées en courant continu, et un champ magnétique variable provenant d'un rotor alimenté également en courant continu mais dont le sens est inversé périodiquement grâce à un dispositif appelé collecteur.[2]

L'une des caractéristiques les plus appréciées des moteurs CC est leur capacité à fournir un couple élevé dès le démarrage ainsi que leur vitesse de rotation qui peut être facilement contrôlée et modulée. Cela les rend particulièrement adaptés pour des applications nécessitant précision et adaptabilité comme dans les véhicules électriques, certains appareils domestiques ou encore certaines machines-outils. Cependant, ces types de moteurs nécessitent un entretien régulier lié notamment au remplacement périodique des balais de charbon utilisés pour assurer la commutation du courant dans le rotor.[2]

C. Moteur à courant alternatif (AC)

Le moteur à courant alternatif, également connu sous le nom de moteur AC, est l'une des catégories principales des moteurs électriques. Comme son nom l'indique, ce type de moteur fonctionne grâce aux forces induites par une tension alternative dans les bobines du stator qui crée alors un champ magnétique tournant. C'est ce dernier qui fait tourner le rotor placé au centre du stator.[2]

Il existe principalement deux types de moteurs à courant alternatif **:** les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones**.** Les premiers tournent à la même vitesse que la fréquence du réseau électrique tandis que les seconds peuvent tourner à une vitesse inférieure.[2]

Un avantage majeur des moteurs AC est qu'ils sont généralement plus efficaces et nécessitent moins d'entretien que leurs homologues DC car ils n'utilisent pas de balais pour faire passer le courant. Cependant, le contrôle de leur vitesse peut être plus complexe. Parmi leurs applications typiques figurent les pompes, ventilateurs et climatiseurs ainsi que divers appareils domestiques. Ils sont aussi

largement utilisés dans l'industrie pour alimenter différents équipements mécaniques.[2]

- **Moteur synchrone**

Comme son nom l'indique, le moteur synchrone tourne exactement à la même vitesse que la fréquence du réseau électrique. Il est généralement utilisé pour des besoins en vitesse constante indépendamment des variations de charge comme dans certains gros appareils ménagers ou certaines pompes industrielles. [2]
Il se compose généralement d'un rotor(ou partie mobile) et d'un stator (partie fixe). Le champ magnétique produit par le stator fait tourner le rotor à la même vitesse ou "synchronisme". En effet, ces types de moteurs peuvent utiliser soit un aimant permanent soit un champ magnétique généré électriquement pour tourner à la même fréquence que le courant alternatif. Le rendement est élevé pour ces types de machines car ils ont moins ou pas du tout besoin d'énergie supplémentaire pour maintenir la synchronisation avec le réseau une fois lancés.[2]
Les avantages des moteurs synchrones incluent leur efficacité énergétique, surtout lorsqu'ils sont utilisés à pleine capacité. Ils sont couramment employés dans les domaines industriels ou encore dans certains types spécifiques d'équipements tels que les pompes hydrauliques et certaines grosses machines-outils] .2]

- **Moteur asynchrone**

Le moteur asynchrone, aussi connu sous le nom de «moteur induction», doit son appellation au décalage présent entre la vitesse de rotation du champ magnétique et celle du rotor. Ce type de moteur est le plus utilisé dans l'industrie, en raison notamment de sa robustesse, son coût d'entretien faible et sa simplicité de mise en œuvre. [2]
Dans un moteur asynchrone, un champ magnétique tournant est créé dans le stator (la partie fixe du moteur) par le passage d'un courant alternatif. Ce champ

magnétique induit un courant dans le rotor qui à son tour crée son propre champ magnétique. La réaction entre ces deux champs génère une force qui entraîne la rotation du rotor.[2]

L'une des principales forces du moteur asynchrone est son coût relativement faible par rapport aux autres types de moteurs. Ils sont généralement employés dans la plupart des applications industrielles et résidentielles pour le pompage, la ventilation ou encore les systèmes de climatisation. Cependant il n'est pas adapté aux charges nécessitant un couple élevé à basse vitesse. Leur performance est généralement inférieure aux moteurs synchrones en termes d'efficacité énergétique, mais leur simplicité mécanique et leur résilience les rendent idéales pour une multitude d'applications industrielles. Les applications classiques des moteurs asynchrones incluent les pompes, ventilateurs ou systèmes HVAC où il y a besoin principalement d'une source motrice constante.[2]

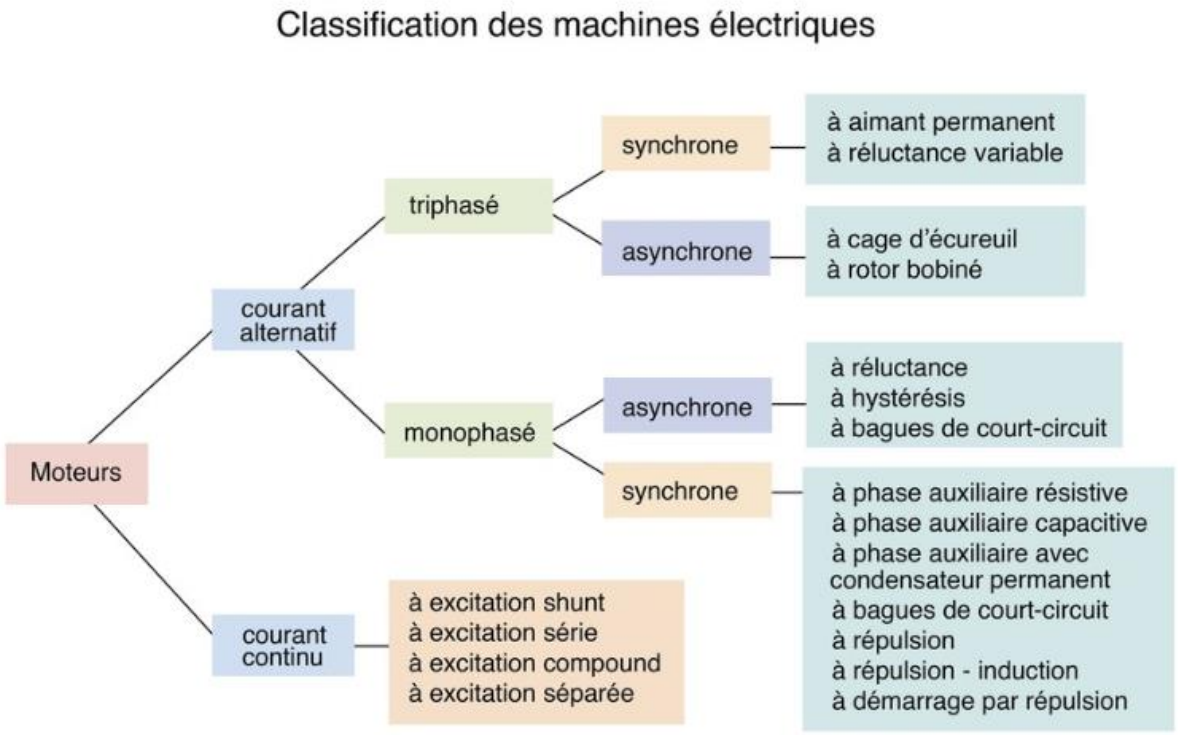


Figure I.3 :classification des machines électriques

D. Les générateurs électriques

Les générateurs électriques sont des dispositifs conçus pour produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie [3]. Ils maintiennent une différence de potentiel durable, assurant ainsi le fonctionnement des équipements alimentés électriquement [4]. Les générateurs convertissent diverses formes d'énergie, comme l'énergie mécanique, solaire, thermique ou chimique, en énergie électrique



Figre I.4 **:** un générateur électrique américain de la General Electric.

1. Développement Historique

- Découverte de l'induction électromagnétique: Michael Faraday a découvert l'induction électromagnétique en 1831, établissant ainsi les bases des générateurs modernes[5]. Il a constaté qu'il pouvait produire du courant électrique en faisant tourner une bobine ou un fil dans un champ magnétique [5].

- Premiers générateurs: Le premier générateur électrique a été inventé par Michael Faraday. Il produisait un courant électrique continu à l'aide d'un disque tournant dans un champ magnétique [5].

- Dynamos: Suite à l'invention de Faraday, des générateurs appelés dynamos ont été développés. Ces générateurs produisent de l'électricité à l'aide d'une bobine

tournant dans un champ magnétique [5]. Zénobe Gramme a inventé une génératrice de courant continu appelée dynamo [3].

- Alternateurs: Des alternateurs ont été développés pour produire du courant alternatif (CA). Nikola Tesla a contribué à la popularisation des générateurs de courant alternatif [5].

2. Types de Générateurs Électriques

- Générateurs mécaniques: Ils utilisent l'énergie mécanique pour fonctionner et sont courants dans l'industrie [4].
- Générateurs solaires: Ils captent l'énergie solaire et la transforment en énergie électrique, à l'instar des panneaux solaires en silicium [4].
- Générateurs thermiques: Ils convertissent l'énergie thermique en électricité [4].
- Générateurs chimiques: Ils convertissent l'énergie chimique en énergie électrique, comme les batteries et les piles, et sont souvent utilisés dans les équipements à faible consommation d'énergie [4]

Les générateurs sont utilisés dans divers contextes, notamment les réseaux électriques, l'alimentation de secours et l'alimentation portable [5].

E .Les transformateurs

Le transformateur électrique aussi appelé transfo électrique est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même Fréquence et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation.[8]



Figure I.5 : Transformateur

1. Symboles et schémas d'un transformateur électrique

Dans les schémas électriques, les transformateurs sont représentés par des symboles normalisés. Le plus courant consiste en deux bobines adjacentes, symbolisées par des cercles ou des ovales. Des lignes verticales entre ces bobines indiquent le noyau magnétique. [6] Pour les transformateurs triphasés, on utilise trois paires de bobines. Les connexions primaires et secondaires sont souvent notées avec des lettres (P pour primaire, S pour secondaire) ou des chiffres. [8]

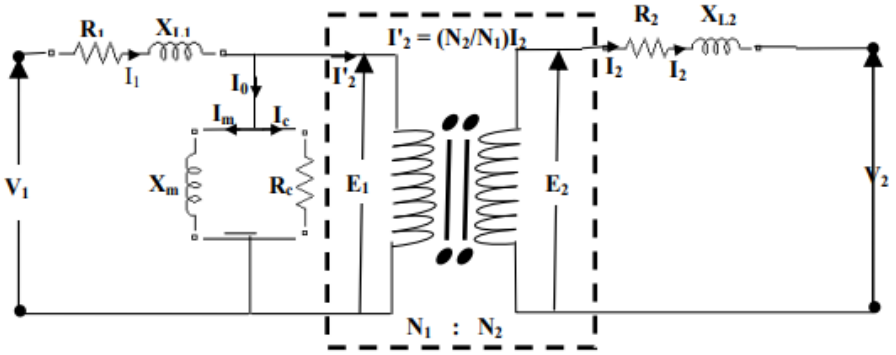


Figure I.6 :Schéma électrique d'un transformateur réel

2 .Types de transformateurs :

- Transformateur élévateur : Augmente la tension d'un niveau inférieur à un niveau supérieur et couramment utilisé dans les centrales électriques pour augmenter la tension pour la transmission longue distance [6.7].

- Transformateur abaisseur : Diminue la tension d'un niveau supérieur à un niveau inférieur et utilisé dans les sous-stations pour réduire la tension pour la distribution aux utilisateurs finaux [6.7]

- Transformateur de distribution **:** Transformateur abaisseur utilisé pour la distribution finale aux ménages et aux entreprises et généralement installé sur des poteaux électriques ou dans des boîtiers montés sur socle [6]. Ces

transformateurs assurent la transformation finale de la tension pour la distribution aux consommateurs. Ils abaissent la tension à un niveau utilisable par les foyers et les entreprises [8].

- Transformateur de puissance : Fait généralement référence aux gros transformateurs utilisés dans les applications à haute puissance et trouvé dans les centrales électriques, les sous-stations et les installations industrielles [6]. Ils sont utilisés dans les réseaux de transmission à haute tension et haute puissance pour transférer l'énergie entre les centrales et les sous-stations8. Ces transformateurs permettent de transporter sur de longues distances de l'électricité tout en réduisant les pertes sur le réseau électrique [9].
- Transformateur d'instrument **:** Comprend les transformateurs de courant (CT) et les transformateurs de tension (VT) et utilisé pour mesurer des courants et des tensions élevés à des fins de protection et de mesure [6]. Destinés à la mesure et à la protection, ces transformateurs permettent de mesurer des tensions ou des courants élevés tout en isolant les équipements de mesure [8]. Ils se déclinent en deux types : les transformateurs de courant et les transformateurs de tension.
- Autotransformateur : Possède un seul enroulement qui sert à la fois d'enroulement primaire et secondaire et utilisé pour les réglages de tension dans les applications industrielles et certains systèmes électriques [6]. En France, un autotransformateur est systématiquement utilisé pour le raccordement entre les réseaux 225 kV et 400 kV [10].
- Transformateur d'isolement **:** Fournit une isolation électrique entre les enroulements d'entrée et de sortie et utilisé pour protéger les équipements sensibles et assurer la sécurité [6].
- Transformateur redresseur : Conçu pour alimenter les redresseurs afin de convertir le courant alternatif (AC) en courant continu (DC) et couramment utilisé dans les applications industrielles telles que la fusion des métaux et les processus électrochimiques

- Transformateur de four : Spécialement conçu pour les applications de fours à arc électrique et alimente les arcs électriques pour la fusion des métaux en milieu industriel
- Transformateur de type sec : Utilise de l'air ou de la résine pour l'isolation au lieu de l'huile et commun dans les applications intérieures et sensibles à l'environnement.
- Transformateur immergé dans l'huile : Immerge les enroulements dans de l'huile isolante pour le refroidissement et l'isolation et couramment utilisé dans les applications haute puissance et les installations extérieures.
- Transformateur en résine coulée : Utilise de la résine époxy pour l'isolation et convient aux installations intérieures avec des puissances nominales inférieures.
- Transformateur à noyau : Ils sont conçus avec un noyau central autour duquel les enroulements sont placés Cette structure permet une meilleure efficacité dans certaines applications industrielles [8].
- Transformateur à coque: Dans ce type, les enroulements sont entourés par le noyau, ce qui offre une meilleure protection mécanique et réduit les pertes [8].
- Transformateur monophasé: Conçus pour fonctionner avec une alimentation monophasée, ils sont souvent utilisés pour des applications domestiques ou spécifiques.
- Transformateur triphasés: Utilisés pour des applications industrielles, ils fonctionnent avec une alimentation triphasée, plus adaptée à des charges importantes.

Le choix du type de transformateur dépend de facteurs tels que l'application, les exigences de tension, la capacité de puissance et les considérations environnementales [6]

I.5. Application des machines électriques :

Les machines électriques sont largement utilisées dans divers domaines grâce à leur capacité à convertir l'énergie électrique en énergie mécanique (moteurs) ou

vice versa (générateurs). Voici quelques applications majeures des machines électriques :

a. Industrie et production

- Moteurs électriques : Utilisés dans les machines-outils, les convoyeurs, les pompes, les compresseurs, etc.

- Générateurs: Produisent de l'électricité dans les centrales électriques (hydroélectriques, thermiques, éoliennes…).

b. Transport

- Trains et métros : Utilisation des moteurs électriques pour la propulsion.

- Voitures électriques et hybrides: Moteurs synchrones ou asynchrones pour la traction.

- Avions et navires électriques : Propulsion et gestion des systèmes de bord.

c. Électroménager

- Moteurs domestiques : Présents dans les réfrigérateurs, climatiseurs, ventilateurs, lave-linge, etc.

- Aspirateurs et robots ménagers: Utilisent des moteurs à courant continu ou universels.

d. Production et distribution d'énergie

- Alternateurs : Utilisés dans les centrales électriques pour produire de l'électricité.

-Transformateurs: Convertissent les niveaux de tension pour la distribution d'énergie.

e. Robotique et automatisation

- Servo-moteurs et moteurs pas à pas **:** Essentiels pour la robotique industrielle et l'automatisation.

f. Énergies renouvelables

- Éoliennes: Générateurs électriques convertissant l'énergie cinétique du vent en électricité.

- Hydroélectricité : Turbines couplées à des générateurs pour produire de l'énergie.

g. Applications médicales

- IRM (Imagerie par Résonance Magnétique): Utilise des moteurs et des générateurs pour produire des champs magnétiques puissants.

- Pompes et équipements hospitaliers : Fonctionnent avec des moteurs électriques.

Les machines électriques sont donc essentielles dans de nombreux secteurs, et leur développement continue d'améliorer l'efficacité énergétique et l'innovation technologique.

I .6. Conclusion

À la fin de ce chapitre, il apparaît clairement que les machines électriques constituent un élément fondamental dans diverses applications industrielles et quotidiennes, grâce à leur capacité à convertir l'énergie d'une forme à une autre

avec une grande efficacité. En les classant en moteurs, générateurs et transformateurs, et en comprenant leurs composants principaux ainsi que leurs principes de fonctionnement, nous avons établi une base théorique solide qui nous permettra de mieux appréhender les phénomènes qui leur sont liés. Cela prépare également le terrain pour l'étude des défauts pouvant les affecter, ainsi que pour leur diagnostic à l'aide des techniques d'analyse des signaux, qui seront abordés dans les chapitres suivants.

Chapitre II : Les différents types des défauts électriques et mécaniques

II.1.Introduction

Les machines électriques, qu'elles soient utilisées pour la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique (moteurs) ou inversement (générateurs), sont soumises à divers défauts pouvant affecter leur performance et leur durabilité. Ces défauts peuvent être classés en deux grandes catégories : les défauts électriques et les défauts mécaniques

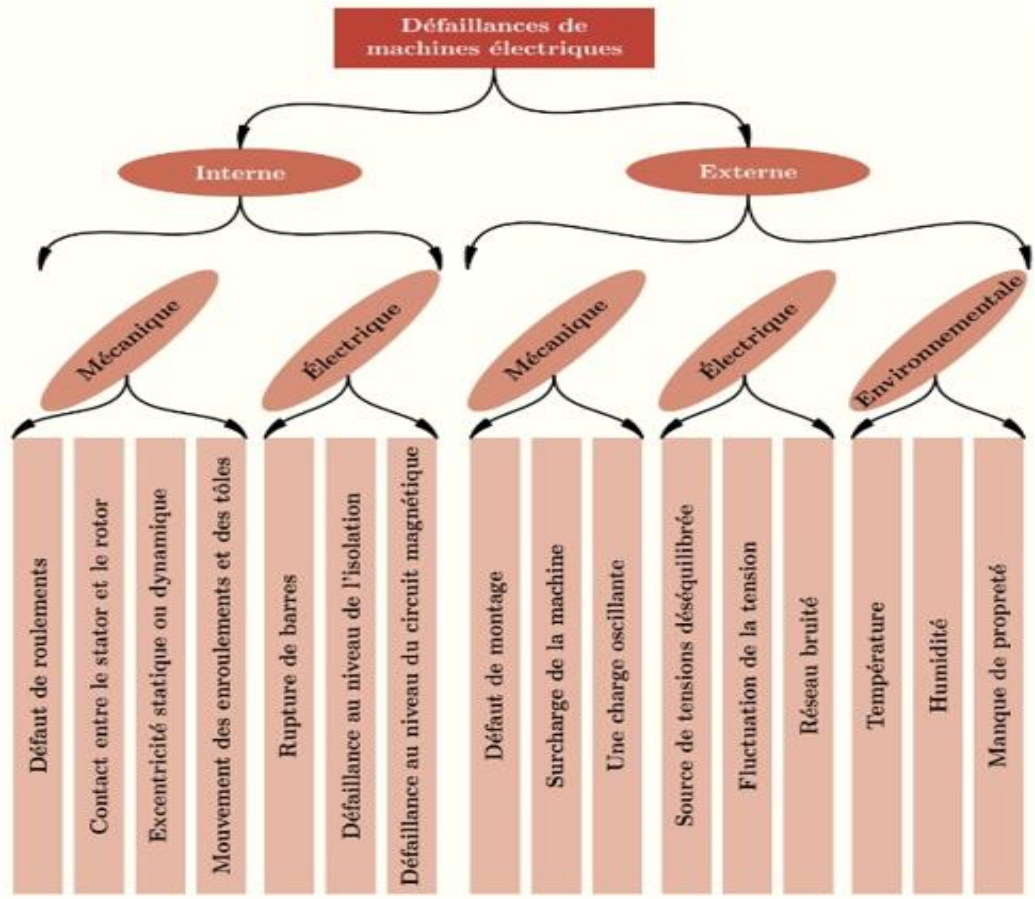


Figure II .1 : classification des défauts selon leurs origines

II.2. les différents types des défauts électriques dans les machines électriques

Un défaut électrique est une altération involontaire des caractéristiques du courant circulant dans un circuit, susceptible de perturber son bon

fonctionnement et d'entraîner une panne. Il se produit lorsque l'intensité (I), exprimée en ampères, ou la tension (U), mesurée en volts, excède les limites établies pour le circuit concerné.

On évoque aussi le terme de défaut électrique lorsqu'un courant de fuite est repéré, c'est-à-dire lorsque de l'électricité « s'échappe » d'un circuit, entraînant une fluctuation de la force du courant mesurée à l'entrée et à la sortie d'une installation.

On identifie habituellement cinq principaux défauts électriques**,** à savoir :

- la surintensité par surcharge

-la surintensité par court-circuit

-la surtension

-la baisse ou manque de tension

-la fuite électrique

Le changement de l'intensité ou de la tension due à un problème électrique peut survenir de manière abrupte, intense, modérée et étendue, mais risque toujours de provoquer un dysfonctionnement variable.

Selon son origine et sa nature, un défaut électrique peut provoquer une panne qui se manifeste généralement par une coupure de courant affectant tout ou partie de l'installation, ou encore par l'arrêt de fonctionnement d'un appareil récepteur.

- disjoncteur

- prise électrique

- interrupteur

- point lumineux

- appareils électriques divers

Un défaut électrique peut également être à l'origine de dommages corporels ou matériels graves (électrisation, départ de feu, explosion). Il faut donc veiller à s'en prémunir et à savoir le circonscrire dès que le problème survient.

a. La surintensité par surcharge électrique

Il s'agit sans doute de l'un des défauts électriques les plus fréquents. Il se produit lorsqu'un trop grand nombre d'appareils, ou des appareils à forte consommation énergétique, sont branchés sur un circuit ou une prise de courant dont la capacité est insuffisante pour fournir une telle quantité d'électricité simultanément. Une surintensité due à une surcharge se manifeste par une augmentation progressive et continue de l'intensité du courant circulant dans le circuit.

Cette sollicitation à outrance du circuit et de ses capacités, même légère, peut provoquer un échauffement lent des conducteurs et des isolants si elle se prolonge dans le temps.

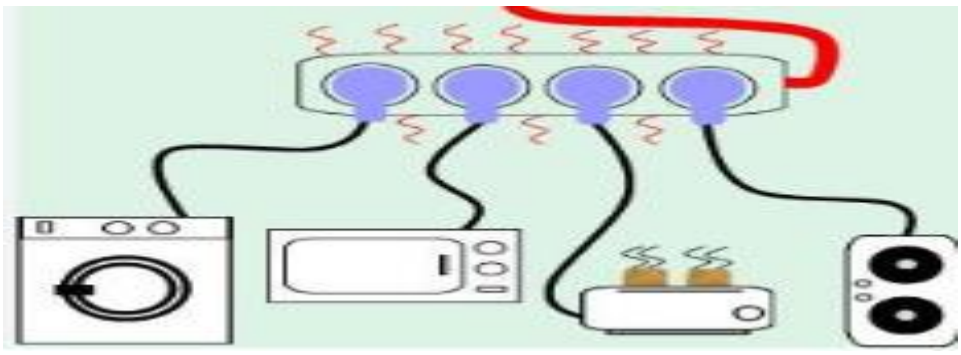


Figure II .2 : la surintensité par surcharge électrique

1. Comment reconnaître une surcharge électrique ?

Le premier indicateur d'une surcharge électrique est l'activation du disjoncteur protégeant le circuit concerné. Si cela se produit, il est essentiel d'éteindre ou de débrancher les appareils connectés à ce circuit avant de tenter de le réenclencher. Si, après cette opération, le disjoncteur ne se déclenche plus, cela confirme qu'il s'agissait bien d'une surcharge due à un nombre excessif d'appareils branchés simultanément.

Toutefois, une surcharge légère peut ne pas suffire à faire disjoncter le circuit, tout en causant progressivement des dommages. Ce type de défaut électrique peut être détecté en observant un échauffement anormal au niveau d'un conducteur ou d'une prise électrique.

2 .Quelles conséquences pour une surcharge électrique ?

Les circuits d'une installation électrique doivent être protégés contre les surintensités par des dispositifs de sécurité tels que les disjoncteurs. Ces derniers, qu'il s'agisse du disjoncteur principal, des disjoncteurs différentiels ou des disjoncteurs divisionnaires, interrompent automatiquement l'alimentation électrique dès que l'intensité du courant dépasse un seuil prédéfini en fonction de leur calibre, exprimé en Ampères (A). Ce seuil est établi comme

Suit :

Type de circuit	Section des fils du circuit (en mm^2)	Calibre du disjoncteur à ne pas dépasser (en Ampère)	Remarques
Points lumineux	1,5 mm^2	16 A	8 points lumineux maximum par circuit
Prises de courant	1,5 mm^2	16 A	8 prises maximum par

			circuit
	2,5 mm^2	20 A	12 prises maximum par circuit
Volets roulants	2,5 mm^2	16 A	1 circuit dédié pour tous les volets
Radiateurs électriques	2,5 mm^2	20 A	1 circuit par tranche de 4 500 W
Appareil électro-ménager (lave-linge, congélateur, etc.)	2,5 mm^2	20 A	1 circuit dédié par appareil
Plaques de cuisson	6 mm^2	32 A	1 circuit dédié

Tableau 1 : Calibres des disjoncteurs selon les circuits

Il est toutefois possible qu'un disjoncteur inadapté ou défectueux ne remplisse pas correctement son rôle de protection, permettant ainsi au courant de dépasser la capacité maximale du circuit. Ce dépassement peut entraîner, à des degrés divers, une surchauffe des conducteurs électriques, qui ne sont pas conçus pour supporter une telle intensité de courant.

Une surintensité par surcharge électrique peut ainsi avoir plusieurs conséquences :

- le déclenchement des dispositifs de protection dans le tableau électrique et la coupure automatique de l'alimentation électrique dans le circuit concerné ou dans toute l'installation ;
- l'interruption définitive du passage du courant dans le circuit concerné suite à la détérioration des conducteurs ;

- un court-circuit causé par la détérioration des isolants des conducteurs entraînant la mise en contact accidentel de deux fils. [19]

b .La surintensité par court-circuit

Contrairement à une surintensité causée par une surcharge, une surintensité due à un court-circuit se manifeste généralement de manière soudaine et intense, atteignant en quelques millisecondes jusqu'à mille fois l'intensité normale.

Un court-circuit survient lorsque deux points d'un circuit présentant une différence de potentiel entrent accidentellement en contact. Cela peut se produire, par exemple, en raison de la détérioration des isolants des conducteurs ou d'un niveau d'humidité élevé facilitant le passage du courant électrique entre deux circuits

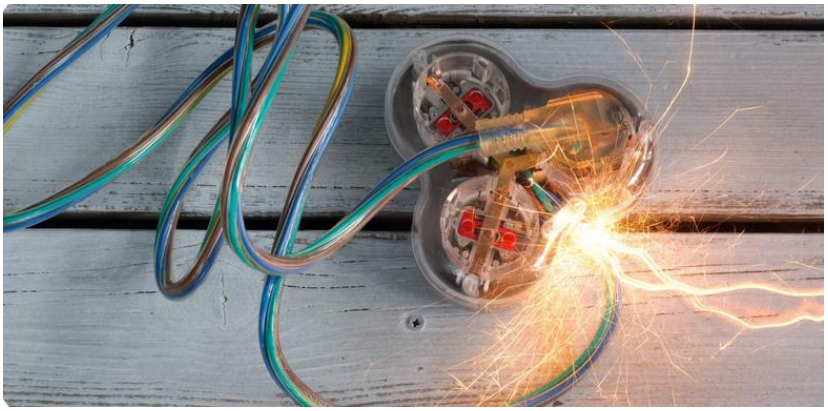


Figure II.3 : La surintensité par court-circuite

1 .Classification des courts-circuits selon leur nature et gravité

En fonction de sa durée

- auto-extincteur : le court-circuit est bref, ne déclenche pas le disjoncteur et se résorbe de lui-même sans nécessiter d'intervention,

- fugitif : le court-circuit déclenche le disjoncteur et provoque de brèves coupures de courant mais se résorbe de lui-même sans nécessiter d'intervention,

- semi-permanent : le court-circuit déclenche le disjoncteur et provoque une ou plusieurs longues coupures de courant mais se résorbe de lui-même sans nécessiter d'intervention,

- permanent : le court-circuit déclenche le disjoncteur et provoque une coupure de courant persistante et nécessitant l'intervention d'un électricien ;

En fonction de son origine

-mécanique : si deux conducteurs entrent en contact suite à la rupture accidentelle d'un connecteur, à un branchement mal réalisé ou usagé ou au passage d'un rongeur par exemple,

-surcharge électrique : si le court-circuit est provoqué par les effets d'une surintensité prolongée ayant détérioré le circuit et ses composants,

-surtension d'origine atmosphérique : si le court-circuit est la conséquence d'un coup de foudre.

En fonction des conducteurs concernés

-monophasé : lorsque le court-circuit est causé par la mise en contact d'une phase et d'un neutre,

- biphasé : lorsque le court-circuit est causé par la mise en contact de deux phases,

- biphasé-terre : lorsque le court-circuit est causé par la mise en contact de deux phases et d'une terre,

- biphasé et phase-terre : lorsque le court-circuit est causé par la mise en contact de deux phases et la mise en contact de la troisième phase avec la terre,

- triphasé : lorsque le court-circuit est causé par la mise en contact de trois phases,

- triphasé-terre : lorsque le court-circuit est causé par la mise en contact de trois phases et d'une terre ;

En fonction de la nature de la connexion

- franc : lorsque les deux points du court-circuit entrent directement en contact,

-impudent : lorsque les deux points du court-circuit sont mis en contact *via* un matériau conducteur (mur humide, arbre, etc.).

c. Comment reconnaître un court-circuit

Un court-circuit est difficile à détecter, car ses effets peuvent ressembler à ceux d'une surcharge électrique. Toutefois, en raison de l'intensité bien plus élevée du courant qu'il génère, ses manifestations sont souvent plus marquées et plus spectaculaires. Parmi les signes révélateurs d'un court-circuit, on retrouve :

- Le déclenchement du disjoncteur protégeant le circuit concerné.

- Une panne électrique locale, affectant un circuit, un interrupteur ou une prise, nécessitant l'intervention d'un électricien pour identifier la source du problème et remplacer les composants endommagés.

- L'apparition d'un arc électrique ou d'étincelles au niveau du point de contact, témoignant d'un passage brutal du courant.

d. Comment éviter un court-circuit ?

Dans la plupart des cas, les conséquences d'un court-circuit sont évitées grâce à l'intervention d'un disjoncteur, qui interrompt immédiatement le passage du courant dès qu'il détecte une surintensité excessive. Cependant, si les dispositifs de protection ne fonctionnent pas correctement et que le courant continue de circuler, l'élévation soudaine de l'intensité peut entraîner :

- Un échauffement intense autour du point de contact, pouvant endommager les composants électriques.

- Un risque d'électrisation ou d'électrocution, mettant en danger les personnes à proximité.

- Un départ de feu, pouvant se propager rapidement en raison de la chaleur excessive générée.

3. La surtension

Une surtension se caractérise par une augmentation soudaine de la tension électrique (exprimée en Volts) circulant dans une installation. Elle peut être causée par plusieurs facteurs, notamment :

- Un coup de foudre : lorsqu'un éclair frappe une ligne électrique, un courant de plusieurs milliers de volts se propage instantanément depuis le point d'impact jusqu'au sol, empruntant le chemin le plus conducteur disponible. Dans certains cas, ce chemin peut inclure les câblages de votre installation électrique intérieure.

- Un contact accidentel entre une ligne haute tension et une ligne du réseau basse tension, provoquant un afflux de courant anormalement élevé.



Figure II .4: La surtension

- L'allumage d'un appareil électrique à forte consommation d'énergie, bien que ces surtensions soient généralement moins intenses que celles résultant d'un coup de foudre ou d'une défaillance majeure du réseau électrique.

a. Comment reconnaître une surtension ?

Si votre installation est exposée à une surtension majeure causée par la foudre ou un dysfonctionnement du réseau, les signes ne tarderont pas à apparaître. Vous remarquerez probablement des pannes électriques affectant une partie ou la totalité de votre installation, ainsi qu'un dysfonctionnement généralisé de vos appareils électriques. Un indicateur particulièrement révélateur est la détérioration simultanée de toutes vos ampoules : si elles sont grillées en même temps, il ne fait aucun doute que votre installation a subi les effets d'une surtension due à la foudre.

b.Quelles conséquences pour une surtension ?

Les conséquences d'une surtension varient en fonction du niveau de protection de votre installation et de l'intensité du phénomène. Si la foudre frappe à proximité de votre domicile et que votre tableau électrique n'est pas équipé d'un parafoudre, la décharge électrique peut remonter jusqu'aux extrémités de votre

installation (prises, interrupteurs, appareils branchés, etc.), atteignant alors plusieurs milliers de volts.

Dans les cas les plus sévères, une surtension peut rendre l'ensemble de l'installation hors service. Elle peut provoquer la fusion des conducteurs, engendrer des courts-circuits en cascade, déclencher des départs de feu, voire entraîner l'explosion de certains appareils particulièrement sensibles aux variations brutales de tension.

Les surtensions de moindre intensité, comme celles provoquées par l'allumage d'appareils électriques à forte consommation d'énergie, tels que les plaques de cuisson, sont nettement moins dangereuses. Toutefois, à long terme, elles peuvent fragiliser les circuits électriques de votre installation et entraîner une usure prématurée de certains composants, notamment en réduisant la durée de vie des ampoules.

4. La baisse ou le manque de tension

Lorsqu'un courant électrique circule dans un conducteur, une partie de l'énergie est convertie en chaleur sous l'effet Joule. Ce phénomène entraîne naturellement une chute de tension (exprimée en Volts) entre le début et la fin du circuit. Cependant, si cette chute est excessive, elle devient un défaut électrique susceptible de provoquer des dysfonctionnements, voire des pannes sur certains appareils.

En France, la norme NF C 15-100, qui régit la conception des installations électriques privatives, fixe la tension nominale à 230 V en monophasé et 400 V en triphasé. Elle considère qu'une chute de tension reste acceptable et sans impact si elle ne dépasse pas :

- 3 % de la tension nominale pour un circuit d'éclairage ;

- 5 % de la tension nominale pour les autres circuits (prises de courant, radiateurs électriques, volets roulants, etc.).

Ainsi, dans une installation domestique en monophasé, la tension ne doit jamais descendre en dessous de 223 V en tout point du circuit. En dessous de ce seuil, on parle de baisse ou de manque de tension.

Dans la majorité des cas, ce type de défaut trouve son origine en dehors de l'installation et résulte de perturbations sur le réseau électrique, généralement causées par des intempéries comme de fortes pluies ou des chutes de neige, affectant la distribution du courant.

Une baisse de tension peut également résulter d'une sollicitation excessive de votre installation électrique, notamment lorsque plusieurs appareils énergivores fonctionnent simultanément. Cette surcharge temporaire peut entraîner une diminution de la tension disponible sur certains circuits.

Par ailleurs, un fil rompu, endommagé ou mal connecté peut entraver la circulation normale du courant, provoquant ainsi une baisse de tension localisée dans une partie de l'installation. Ce type de défaut nécessite une intervention rapide afin d'éviter d'éventuels dysfonctionnements ou risques électriques.

a.Comment reconnaître une baisse de tension

La majorité des appareils électriques étant conçus pour fonctionner à 230 Volts**,** une tension inférieure peut entraîner une perte de puissance ou même empêcher leur bon fonctionnement. Concrètement, si vous constatez une baisse de luminosité de vos ampoules ou que vos appareils électriques semblent tourner au ralenti**,** cela indique très probablement une baisse de tension au sein de votre installation. Ce phénomène peut affecter la performance et la durabilité de vos équipements électriques, nécessitant une vérification rapide de l'installation.

b.Quelles conséquences pour une baisse de tension

Une baisse de tension se traduit par une diminution du voltage de l'électricité circulant dans un circuit ou dans l'ensemble de l'installation électrique. Contrairement à d'autres défauts électriques, ce phénomène ne représente aucun danger pour l'intégrité des composants du circuit ni pour la sécurité des occupants. Toutefois, il peut affecter le bon fonctionnement des appareils électriques, entraînant une baisse de performance ou des interruptions temporaires.

5. La fuite électrique

Une fuite de courant résulte généralement d'un défaut d'isolement des fils électriques**.** Lorsque des conducteurs dénudés entrent en contact avec un matériau conducteur, tel que la carcasse métallique d'un appareil électroménager, une partie de l'électricité s'échappe du circuit. Ce courant de fuite peut entraîner des risques d'électrisation ainsi qu'une surconsommation d'électricité**.** Ce type de défaut est particulièrement fréquent en milieu humide**,** où l'eau favorise la conduction du courant.

Heureusement, les disjoncteurs différentiels présents sur le tableau électrique sont conçus pour détecter ces fuites. Ils analysent la différence entre le courant entrant et sortant d'un circuit : en cas d'anomalie, ils interrompent automatiquement l'alimentation afin de prévenir les risques pour les personnes et les équipements**.**

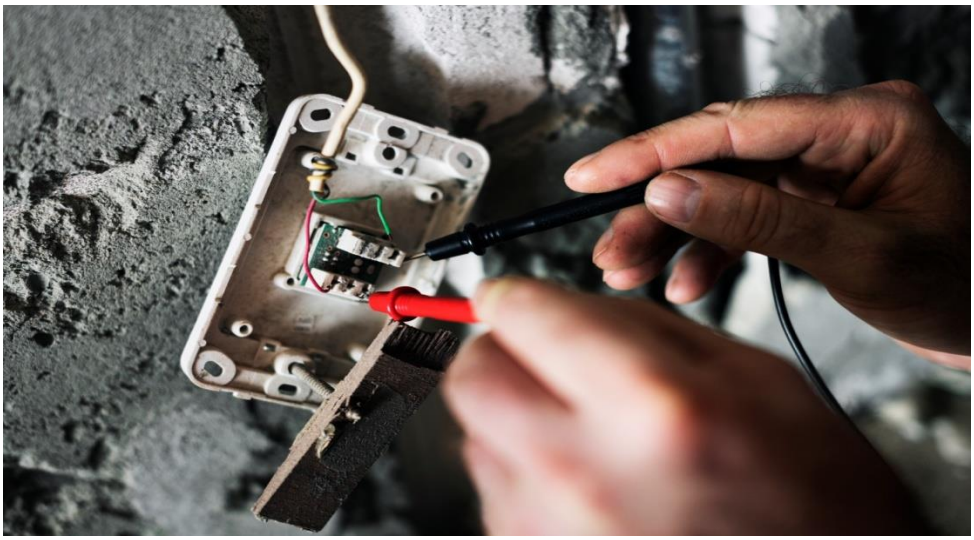


Figure II.5 : La fuite électrique

a. Comment reconnaître une fuite électrique

Il existe deux principales méthodes pour détecter une fuite électrique, bien que la seconde soit à éviter autant que possible :

-Une surconsommation inhabituelle : si votre facture d'électricité augmente sans raison apparente et que vos habitudes de consommation n'ont pas changé, cela peut indiquer la présence d'un courant de fuite.

-Un choc électrique : toucher une huisserie métallique, un mur humide ou la carcasse d'un appareil électrique et ressentir une décharge signifie qu'un courant de fuite est présent. Ce signal est non seulement révélateur, mais aussi potentiellement dangereux.

Pour éviter tout risque, il est recommandé de faire vérifier votre installation par un électricien dès les premiers signes suspects.

b. Quelles conséquences pour une fuite électrique

Un circuit présentant une fuite de courant aura tendance à faire disjoncter systématiquement le disjoncteur différentiel, qui joue son rôle de protection en interrompant l'alimentation jusqu'à ce que la fuite soit identifiée et corrigée.

Cependant, si la fuite est faible (inférieure à 30 mA, seuil de déclenchement des disjoncteurs différentiels) ou si ces derniers sont défectueux, elle peut passer inaperçue et persister dans le temps, entraînant deux conséquences majeures :

-Une surconsommation d'électricité, pouvant alourdir inutilement votre facture énergétique.

-Un risque d'électrisation, mettant en danger les occupants du logement, notamment en milieu humide où la conductivité est plus élevée.

Pour garantir la sécurité de votre installation, il est essentiel de tester régulièrement vos disjoncteurs différentiels et de faire appel à un électricien en cas de suspicion de fuite électrique.

II.3.les diffèrent types des défauts mécaniques dans les machines électriques

Les défaillances des machines électriques sont généralement dues à des problèmes thermiques, électromagnétiques, résiduels, dynamiques ou environnementaux [20]. Les défauts les plus récurrents se situent au niveau du rotor et du stator [20.21].

II.3.a. Défauts liés au rotor

Les défauts liés au rotor sont fréquents dans les machines électriques, en particulier dans les moteurs asynchrones. Ils peuvent être causés par des défauts de fabrication ou d'utilisation [21]. Ces défauts peuvent avoir un impact significatif sur la performance et la durabilité de la machine [22].

1. les principaux types de défauts rotoriques

a. Rupture de barres

La rupture de barres est un défaut courant dans les machines asynchrones, particulièrement au niveau du rotor. Ce problème peut se situer soit au niveau de l'encoche de la barre, soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique [23.24].

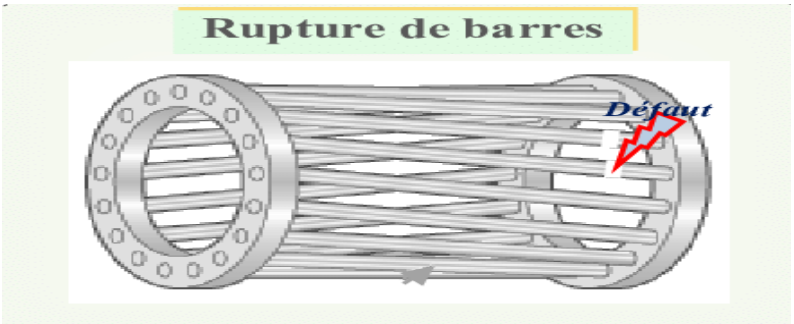


Figure II. 6 : rupture de barres

Cause:

- Démarrage direct de la machine sur le réseau, causant de fortes contraintes thermiques et mécaniques.

- Pulsations de charges soumettant le rotor à des contraintes mécaniques élevées, comme dans les compresseurs et les broyeurs de charbon.

- Imperfections dans le processus de fabrication de la cage rotorique [25].

Conséquence :

- Réduction de la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmentation de l'amplitude des oscillations, entraînant des vibrations mécaniques et un fonctionnement anormal de la machine.

- Oscillations de la vitesse de rotation.

- Les fragments de barres cassées peuvent heurter les enroulements du stator, causant de sérieux dégâts mécaniques à l'isolation et provoquant leur défaillance [23].

- Ondulation de l'amplitude des courants.

- Augmentation des contraintes électriques et thermiques sur les conducteurs adjacents [26].

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques, engendrant un effet de modulation d'amplitude[27]. La grande amplitude des oscillations accélère la détérioration de la machine. Le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées, induisant un effet cumulatif de la défaillance [23.24]. Les courants circulant dans les barres adjacentes aux barres cassées sont très supérieurs à leur valeur nominale, augmentant le risque de défaillances [26].

b. Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit

La rupture d'une portion d'anneau de court-circuit dans les machines électriques, en particulier celles à rotor à cage d'écureuil, est un défaut critique qui peut entraîner des conséquences graves sur le fonctionnement de la machine. Voici une analyse détaillée de ce phénomène.

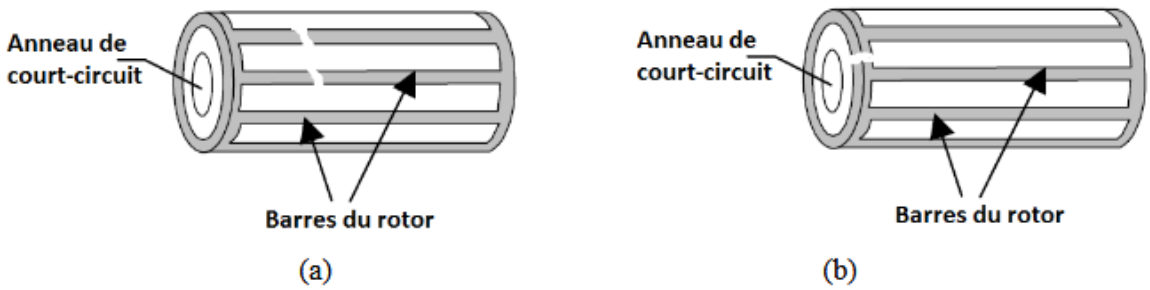


Figure II.7: Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit

Définition et fonction :

L'anneau de court-circuit est une composante essentielle du rotor, reliant les barres conductrices aux extrémités. Il permet la circulation des courants induits dans le rotor, ce qui est crucial pour le fonctionnement des moteurs asynchrones.

Cause de la rupture :

- fatigue mécanique : Les cycles de charge répétés peuvent provoquer des fractures dues à la fatigue. Les oscillations fréquentes et les variations de charge créent des contraintes qui peuvent affaiblir l'anneau au fil du temps.

- surchauffe : Une température excessive, souvent causée par un manque de refroidissement ou des défaillances dans les systèmes de lubrification, peut entraîner une dégradation du matériau et une rupture.

- défauts de fabrication : Des imperfections dans le processus de fabrication, telles que des bulles d'air ou des inclusions dans le matériau, peuvent affaiblir l'anneau et le rendre susceptible à la rupture.

- Dilatation Thermique : Les différences de dilatation entre les barres et l'anneau lors des cycles thermiques peuvent créer des contraintes supplémentaires, menant à une rupture.

Conséquence :

La rupture d'une portion d'anneau de court-circuit peut avoir plusieurs conséquences :

- Perte de performance: La défaillance entraîne une diminution du couple électromagnétique et une augmentation des vibrations, affectant l'efficacité globale du moteur.

- Dommage mécanique : Les fragments résultants peuvent causer des dommages supplémentaires aux composants environnants, y compris le stator et les roulements.

- Risques de sécurité : En cas de rupture, il existe un risque potentiel pour la sécurité, notamment en raison de projections de fragments métalliques.

c. Excentricité du rotor

L'excentricité du rotor est un phénomène important dans les machines électriques, en particulier dans les moteurs asynchrones. Elle se réfère à un décalage entre l'axe de rotation du rotor et l'axe central du stator, ce qui peut avoir des conséquences significatives sur le fonctionnement de la machine.

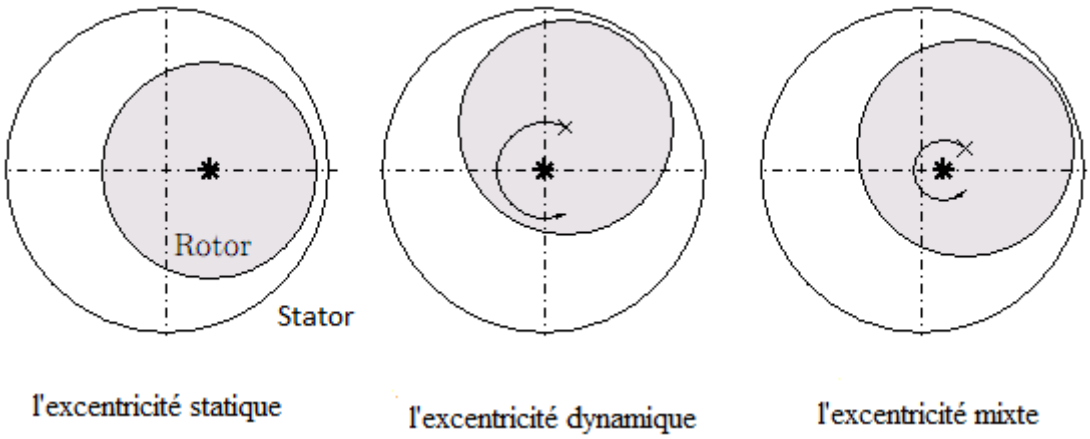


Figure II.8 : Différents types d'excentricités

Types d'excentricités

Excentricité Statique :

Définition : L'excentricité statique se produit lorsque le rotor est décalé de manière fixe par rapport au centre du stator, mais tourne autour de son propre axe.

Cause :

- Mauvais alignement lors de l'assemblage de la machine.

- Défauts de fabrication, tels qu'un noyau statorique mal formé.

Conséquences :

- Variation de l'épaisseur de l'entrefer, entraînant une attraction magnétique déséquilibrée.

- Usure prématurée des roulements et des paliers en raison des forces radiales inégales.

Excentricité Dynamique :

Définition : L'excentricité dynamique se produit lorsque le rotor tourne avec un décalage par rapport à l'axe central du stator, ce qui entraîne une variation continue de l'épaisseur de l'entrefer pendant la rotation.

Cause :

- Déformation du rotor ou du stator.

- Usure des roulements ou défauts dans leur installation.

Conséquences :

- Génération de vibrations et de bruits acoustiques.

- Risque accru de frottement entre le rotor et le stator, pouvant mener à des dommages structurels.

Excentricité Mixte :

Définition : Cette forme combine à la fois l'excentricité statique et dynamique, où les deux types coexistent simultanément.

Conséquences : Amplification des effets négatifs sur les performances de la machine, avec un risque accru d'endommagement.

d. Défauts ou usures des roulements

Les défauts ou usures des roulements dans les moteurs électriques sont des problèmes fréquents qui peuvent entraîner des pannes coûteuses et des temps d'arrêt prolongés. Voici un aperçu des causes, des conséquences et des mesures préventives associées à ces défauts.

Causes de Défaillance des Roulements

Mauvaise Lubrification :

- Une lubrification insuffisante ou inappropriée est l'une des principales causes de défaillance. Cela peut entraîner une friction excessive, une surchauffe et une usure prématurée des roulements [28.29].

- Il est essentiel d'utiliser le bon type de lubrifiant et de suivre les recommandations du fabricant concernant la fréquence et la méthode d'application [28].

Contamination :

- La présence de particules étrangères, comme la poussière ou l'humidité, peut contaminer les roulements, réduisant ainsi l'efficacité de la lubrification et accélérant l'usure.

- L'utilisation de joints d'étanchéité peut aider à protéger les roulements contre ces contaminants.

Surcharge :

- Faire fonctionner un moteur au-delà de sa capacité nominale crée une pression excessive sur les roulements, ce qui peut entraîner leur défaillance [28.29].

- Respecter les spécifications de charge recommandées par le fabricant est crucial pour prévenir ce problème.

Mauvaise Installation :

- Un montage incorrect, comme un ajustement inadéquat ou un serrage excessif, peut endommager les roulements dès le départ.

- Suivre les instructions du fabricant lors de l'installation est primordial pour éviter ces erreurs.

Usure Normale :

Avec le temps, même en respectant toutes les bonnes pratiques, les roulements s'usent naturellement en raison de l'utilisation continue [28.29].

Conséquences des Défaillances :

- Vibrations et Bruit : Les roulements défectueux augmentent la friction, ce qui entraîne des vibrations excessives et du bruit. Ces vibrations peuvent également affecter d'autres composants de la machine.

- Chauffage excessif : L'augmentation de la friction génère plus de chaleur, ce qui peut provoquer une défaillance complète du roulement en quelques mois si non traité [29].

-Pannes mécaniques: Les défaillances des roulements sont responsables d'environ 60 % des pannes mécaniques dans les installations industrielles. Elles

peuvent entraîner des dommages supplémentaires aux moteurs et nécessiter des réparations coûteuses.

e. Désalignement

Le désalignement, un problème courant dans les machines tournantes, se produit lorsque les axes médians de deux arbres couplés ne correspondent pas. Il est considéré comme la deuxième source de vibration la plus répandue après le déséquilibre [30].

Type de désalignement :

- parallèle (radial) : Les axes médians des deux arbres de rotation ne sont pas alignés.

- Angulaire (axial) :L'écart est observé par l'angle formé entre les axes médians dans un plan de l'espace.

- Combiné : Combinaison de défauts parallèles et angulaires, étant la situation la plus courante [31]

Conséquences du désalignement :

- usure prématurée : Accélère l'usure des composants des machines rotatives, ce qui réduit considérablement leur durée de vie [32.31].

Les contraintes augmentent sur les accouplements, les roulements et autres composants, entraînant une fatigue et une défaillance prématurées. Un arbre mal aligné transmet des forces cycliques dommageables le long de l'arbre et dans le moteur, ce qui se traduit par l'usure excessive du moteur et une augmentation de la charge mécanique apparente [33]

- surchauffe :Le frottement engendre une surchauffe qui peut nuire aux performances des machines et augmenter la dilatation thermique, ce qui accentue le désalignement.

- vibration excessives : Augmente les vibrations radiales et axiales [20]. Un alignement incorrect risque d'induire des vibrations aussi bien dans la charge que sur l'arbre d'entraînement du moteur.

- défaillance prématurée : Du roulement, du joint, de l'arbre ou de l'accouplement.

- température élevée Du boîtier à proximité des roulements ou température élevée de l'huile.

- Fluide d'huile Quantité excessive de fuite d'huile dans les joints de palier.

- vis de fondation desserrées ("faux support")

- réduction de l'efficacité de machine l'augmentation de la température, du bruit ou des vibrations dissipent une partie de l'énergie qui aurait dû être convertie en travail [30].

- augmentation de la consommation d'énergie Un alignement correct peut réduire la consommation d'énergie jusqu'à 15%.

Détérioration des roulements L'élément de la machine qui souffre le plus du désalignement d'un axe, recevant une charge beaucoup plus élevée que celle pour laquelle il a été conçu [30.34].

- détérioration des joints Les éléments d'étanchéité n'assurent pas un contact optimal avec l'arbre, entraînant des fuites et des contaminations.

- séchage des pièces en caoutchouc Un désalignement peut causer une surchauffe des accouplements, entraînant le séchage des pièces en caoutchouc (couramment utilisées dans ces éléments).

II.3.b Défauts liés au stator

Les défauts liés au stator dans les machines asynchrones peuvent être causés par divers facteurs, incluant des problèmes thermiques (surcharge), électriques (diélectriques), mécaniques (bobinage) et environnementaux (agression). Ces défauts peuvent se manifester de différentes manières, affectant le fonctionnement et la fiabilité du moteur [35.23].

1. Types de défauts statoriques

- Défaut d'isolement dans un enroulement : La dégradation des isolants peut provoquer des courts-circuits en raison des pertes (Joule, fer, mécaniques, etc.) qui engendrent des phénomènes thermiques augmentant la température des constituants du moteur. Si l'environnement de travail dépasse les limites thermiques, électriques et mécaniques de l'isolant, ce dernier se dégrade prématurément [23].

- Courts-circuits inter –spires :Ces défauts apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques et peuvent être causés par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent, entraînant une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique [35].

- Ouverture d'une phase **:**Une phase de l'enroulement statorique est interrompue (ex : fil coupé, soudure).

- Court-circuit dans une phase **:**Court-circuit entre les enroulements de deux phases différentes du stator.

2. **Causes des défauts statoriques**

- Problèmes thermiques (surcharge): Une surcharge peut provoquer des problèmes au niveau du stator.
- Problèmes électriques (diélectriques): Les défauts électriques peuvent affecter le stator
- Problèmes mécaniques (bobinage): Les contraintes mécaniques peuvent endommager le bobinage du stator.
- Problèmes environnementaux (agression): L'environnement dans lequel le moteur opère peut causer des dommages au stator.

II .4.Conclusion

Ce chapitre a présenté les principaux types de défauts pouvant affecter les machines électriques. Ces défauts sont classés en deux catégories : les défauts électriques tels que les courts-circuits entre spires, entre phases, ou les fuites à la masse, et les défauts mécaniques tels que la rupture de barres, le désalignement du rotor, ou l'usure des roulements. Ces anomalies ont un impact direct sur la performance et le rendement de la machine, et peuvent entraîner son arrêt complet si elles ne sont pas détectées à temps. La compréhension de ces défauts constitue une étape essentielle pour analyser le comportement de la machine en fonctionnement, et elle représente la base pour le choix des méthodes de détection et de diagnostic qui seront abordées dans les chapitres suivants.

Chapitre III : Les différentes méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

III.1.Introduction

Ce chapitre fait suite à l'étude des défauts dans les machines électriques présentée précédemment. Il se concentre sur les différentes méthodes de diagnostic permettant de détecter et d'identifier ces défauts avec précision. Le diagnostic des défauts dans les machines électriques est essentiel pour garantir leur bon fonctionnement, réduire les coûts de maintenance et éviter les interruptions de production. Plusieurs méthodes de diagnostic sont utilisées, chacune adaptée à des types spécifiques de défauts. Voici un aperçu des principales approches :

2. Analyse des signaux vibratoires

L'analyse des signaux vibratoires est une méthode essentielle pour surveiller l'état des équipements mécaniques et détecter les anomalies. Elle repose sur la collecte, le traitement et l'interprétation des signaux générés par les vibrations des machines.



Figure III.1 : Technique Analyse des signaux vibratoires

Principe : L'analyse vibratoire est basée sur l'idée que les structures mécaniques, lorsqu'elles sont soumises à des efforts dynamiques, produisent des vibrations dont les fréquences correspondent à celles des forces excitées. Ces vibrations peuvent être mesurées à l'aide de capteurs spécifiques, tels que les accéléromètres, capteurs de vitesse ou de déplacement, qui convertissent les mouvements en signaux électriques pour une analyse ultérieure [37]

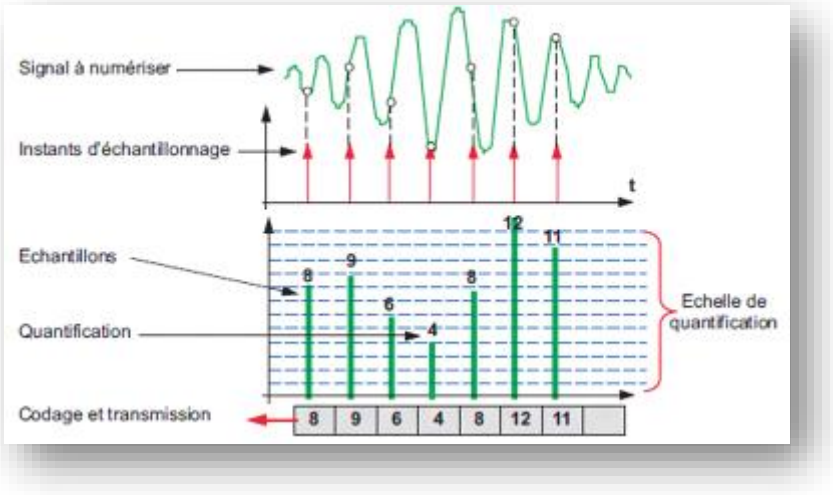


Figure III.2 : Numérisation d'un signal analogique

Techniques utilisées : Les techniques d'analyse varient selon les besoins et la nature des signaux vibratoires. Voici les principales méthodes utilisées :

Analyse fréquentielle

- Utilise-la transformée de Fourier (FFT) pour convertir un signal du domaine temporel au domaine fréquentiel.

- Permet d'identifier les fréquences caractéristiques des vibrations et d'isoler les défauts spécifiques tels que déséquilibres ou usures[38.39]

- Limitation : La FFT ne fournit pas d'informations sur la variation temporelle des fréquences.

Analyse temporelle

Étudie les variations du signal dans le temps pour détecter des événements transitoires ou non stationnaires.

- Utile pour analyser les chocs ou les anomalies soudaines [37]

Analyse spectrale

- Combine les informations temporelles et fréquentielles pour une meilleure résolution.

- Techniques avancées incluent :

- Transformée en ondelettes (WaveletTransform) : Idéale pour détecter des événements transitoires grâce à sa capacité multi-échelle [38.40].

- Transformée de Hilbert-Huang (HHT) : Décompose un signal en modes intrinsèques adaptatifs et extrait les fréquences instantanées [40].

Méthodes basées sur l'intelligence artificielle

- Utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique pour détecter des modèles complexes dans les données vibratoires.

- Ces méthodes permettent une analyse prédictive et une détection précoce des défauts[41]

Techniques de résonance

- Utilisées pour le dépistage précis des défauts de roulements ou engrenages, en isolant les fréquences supérieures à 20 kHz

Vibrométrie modale

- Permet de visualiser les modes de vibration d'une structure en deux dimensions, révélant les zones de maximum d'amplitude et les points nodaux[39]

Outils et technologies utilisés

Pour effectuer ces analyses, divers instruments sont nécessaires :

- Capteurs : Accéléromètres, capteurs de vitesse ou déplacement.

- Appareils de mesure : Analyseurs de spectre, oscilloscopes, systèmes de surveillance en continu.

- Logiciels avancés : Logiciels spécialisés utilisant FFT, ondelettes ou IA pour le traitement et l'interprétation.

.-Avantages : Efficace pour détecter les problèmes mécaniques.

-Limites : Moins adaptée aux défauts électriques.

3. Analyse du courant statorique

L'analyse du courant statorique est une technique essentielle pour le diagnostic des moteurs asynchrones, permettant de détecter des défauts électriques et mécaniques grâce à l'étude des signatures fréquentielles et temporelles. Voici ses principes fondamentaux :

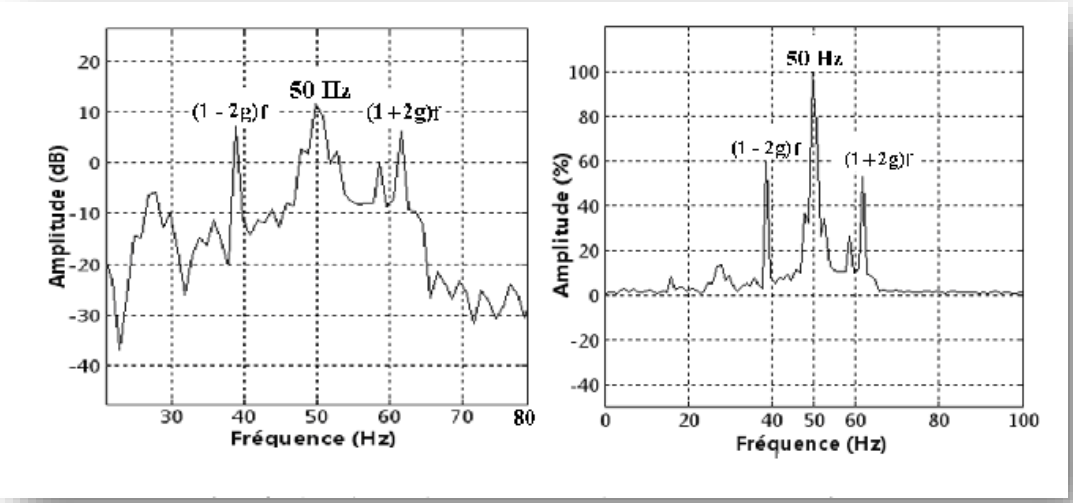


Figure III.3 :Analyse spectrale du courant statorique

- **Principe**

Distribution du champ magnétique : Le champ magnétique dans l'entrefer du moteur influence les courants statoriques. Les défauts modifient cette distribution, affectant ainsi les courants (42.43)

Analyse spectrale : Les courants statoriques sont analysés dans le domaine fréquentiel pour identifier les signatures spectrales spécifiques à chaque type de défaut(44)

-Techniques utilisées :

Analyse spectrale (FFT)

Analyse temps-fréquence (Spectrogrammes)

Représentation tridimensionnelle des courants

Vecteur de Park

Analyse du courant neutre

Réseaux de neurones

Avantages : Permet une surveillance en ligne sans arrêter la machine.

Limites : Nécessite une expertise pour interpréter les données [39]

4. Analyse du champ magnétique de dispersion

L'analyse du champ magnétique de dispersion implique l'étude de la manière dont les champs magnétiques varient dans l'espace et dans le temps, souvent en relation avec la propagation des ondes électromagnétiques ou les interactions entre les champs magnétiques et les matériaux. Voici quelques aspects clés liés à cette analyse :

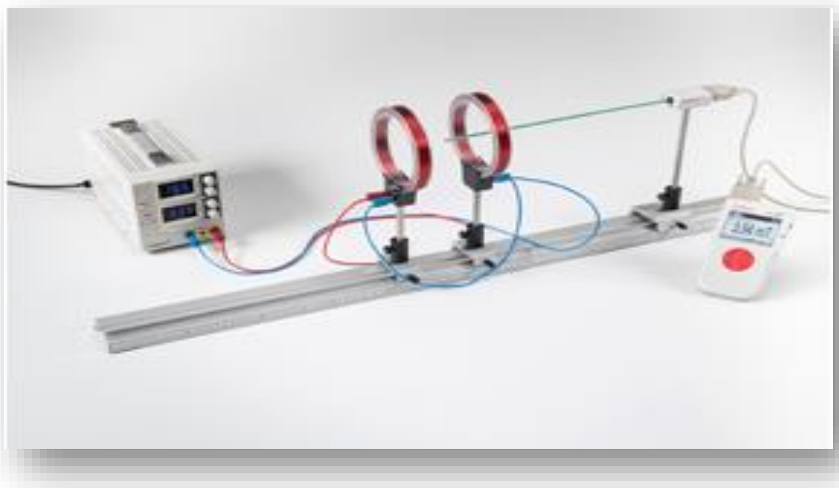


Figure III.4 : Mesure du champ magnétique sur une paire de bobines dans un dispositif de Helmholtz

Principe :

- Champ magnétique : Un champ magnétique est un champ vectoriel qui se manifeste par des forces agissant sur les charges électriques en mouvement, comme décrit par la force de Lorentz [45]
- Dispersion magnétique : La dispersion fait référence à la variation de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques en fonction de leur fréquence, ce qui peut être influencé par les propriétés magnétiques du milieu traversé [46]

.

Méthodes d'analyse :

Loi de Biot-Savart : Cette loi permet de calculer le champ magnétique créé par une distribution de courants électriques. Elle est souvent utilisée pour des distributions filiformes ou volumiques de courants[47.48]

- Équations de Maxwell : Ces équations, notamment l'équation de Maxwell-Ampère, décrivent comment les champs magnétiques interagissent avec les courants électriques et les champs électriques. Elles sont essentielles pour comprendre la dispersion des ondes électromagnétiques dans différents milieux [45.49]

- Méthodes numériques : Des méthodes comme la méthode des éléments finis (FEM) ou des différences finies sont utilisées pour simuler et analyser les champs magnétiques complexes, notamment dans des géométries irrégulières ou des milieux inhomogènes [45]

- Avantages **:**

- Non invasif et facile à mettre en œuvre.

- Fournit des informations sur la localisation du défaut[40]

- Limites : Moins répandue dans l'industrie.

5. Méthodes acoustiques

Les méthodes acoustiques sont utilisées pour analyser et caractériser divers phénomènes physiques, notamment les vibrations et les ondes sonores. Voici quelques aspects clés des méthodes acoustiques :



Figure III.5 : Test, bilan et contrôle acoustique

Principe :

-Propagation des ondes sonores: Les ondes sonores se propagent à travers un milieu (gaz, liquide ou solide) en transportant de l'énergie sous forme de vibrations.

- Caractérisation des matériaux : Les propriétés acoustiques des matériaux, comme le coefficient d'absorption ou l'affaiblissement, sont cruciales pour comprendre leur comportement sous des conditions vibratoires [50]

Méthodes d'analyse acoustique

- Mesures acoustiques : Utilisation de microphones pour mesurer les pressions acoustiques et analyser les spectres fréquentiels des sons [51]

- Analyse modale expérimentale : Technique utilisée pour identifier les modes de vibration d'une structure et comprendre comment ils contribuent au rayonnement acoustique [52]

- Imagerie acoustique : Utilisation de caméras aériennes ou de réseaux de capteurs pour visualiser les déplacements de surface et étudier le couplage acoustique-élastique [53]

- Retournement temporel : Méthode qui permet de focaliser l'énergie acoustique sur une zone

- Avantages : Simple à mettre en œuvre.
- Limites : Sensible aux interférences sonores externes.

6. Tests électriques statiques et dynamiques

Les tests électriques statiques et dynamiques sont deux approches distinctes utilisées pour évaluer les performances et la fiabilité des systèmes électriques. Voici une description détaillée de ces méthodes



Figure III.6 : Tests électriques statiques et dynamiques

a. Tests électriques statiques

Principes fondamentaux

Les tests statiques visent à vérifier les propriétés électriques d'un circuit ou d'un composant sans appliquer de charges dynamiques. Ils incluent généralement des inspections visuelles, des mesures de résistance, des tests de continuité et l'analyse de la documentation technique.

Types de tests statiques

- Inspection visuelle : Vérification des connexions, des composants et des câblages pour détecter les erreurs de montage ou les dommages physiques.

- Mesures de résistance : Utilisation d'un ohmmètre pour vérifier les résistances entre les composants et détecter les courts-circuits ou les interruptions.

- Tests de continuité: Vérification que les circuits sont bien connectés et qu'il n'y a pas d'interruptions.

- Analyse de la documentation : Examen des schémas électriques et des spécifications techniques pour s'assurer que le système est conforme aux normes et aux exigences de conception.

Tests spécifiques

-Tests de décharge électrostatique (ESD): Bien que souvent associés à des tests dynamiques, les tests ESD peuvent inclure des phases statiques où les composants sont vérifiés pour leur sensibilité aux décharges électrostatiques sans être soumis à des conditions dynamiques. Cependant, les tests ESD impliquent généralement une simulation dynamique de décharge pour évaluer la robustesse des dispositifs électroniques[54.55]

- Tests de compatibilité électromagnétique (CEM) **:** Bien que ces tests soient souvent dynamiques, les phases préliminaires peuvent inclure des vérifications statiques pour s'assurer que les composants sont correctement configurés avant les tests dynamiques.

Avantages et limites

Avantage :

- Détection précoce des erreurs: Les tests statiques permettent d'identifier les problèmes de conception ou de fabrication avant la mise en service.

- Sécurité: Ils réduisent le risque de dommages aux composants ou aux personnes lors des tests dynamiques.

Limite :

-Manque de simulation réelle : Les tests statiques ne reflètent pas le comportement réel du système sous des conditions opérationnelles dynamiques.

b. Tests électriques dynamiques

Les tests électriques dynamiques sont des procédures utilisées pour évaluer les performances et la fiabilité des systèmes électriques sous des conditions réelles de fonctionnement. Voici quelques aspects clés liés à ces tests :

Principes fondamentaux

Les tests dynamiques impliquent l'exécution du système sous tension, en appliquant des charges variables pour simuler les conditions réelles d'exploitation. Ils permettent d'évaluer la réponse du système à des stimuli dynamiques, tels que des changements de fréquence, de tension Types de tests dynamiques

- Tests de tension d'alimentation : Vérification de la stabilité du système sous différentes tensions d'alimentation.

- Tests de fréquence : Évaluation de la réponse du système à des fréquences variables, souvent utilisé pour les moteurs et les générateurs.

- Tests de rotation de phase : Utilisés pour vérifier le comportement des moteurs triphasés en cas de changement de phase.

- Tests de surcharge et de court-circuit **:** Évaluation de la capacité du système à résister aux surcharges et aux courts-circuits.

- Méthodes et outils

- Utilisation d'équipements spécialisés : Des appareils comme les générateurs de signaux et les oscilloscopes sont utilisés pour appliquer et mesurer les conditions dynamiques.

- Logiciels de simulation: Certains logiciels permettent de simuler des conditions dynamiques avant de procéder à des tests physiques.

- Capteurs et transducteurs **:** Utilisés pour mesurer les paramètres électriques tels que la tension, le courant et la puissance.

Avantage:

- Simulation réelle **:** Les tests dynamiques permettent de simuler les conditions réelles d'exploitation, offrant une évaluation plus précise des performances.

- Détection précoce des défauts **:** Ils aident à identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne causent des pannes.

7. Méthodes Visuelles de Diagnostic

Description

L'inspection visuelle reste l'une des premières étapes dans le diagnostic des machines électriques. Elle permet de détecter des problèmes évidents tels que des connexions lâches, des signes de surchauffe ou de dégradation des composants.

Application

- Inspection des câbles, des bornes et des contacts.
- Vérification de l'intégrité mécanique (fissures, déformation, usure).

8. Méthodes Thermiques

Description

Les caméras thermiques sont utilisées pour détecter des points chauds dans les machines électriques, ce qui peut être un indicateur de défaillance, comme une surcharge, une dégradation des composants ou un dysfonctionnement du système de refroidissement.

Application

- Inspection thermique pour identifier des composants échauffés, ce qui pourrait indiquer des problèmes comme des courts-circuits ou des défaillances dans les enroulements.

9. Méthodes Ultrasonores

Description

Les tests ultrasonores sont utilisés pour détecter des défauts internes dans les composants des machines électriques, tels que des fissures, des défauts de matériau ou des anomalies dans les isolants.

Application

-Détection de fissures dans les matériaux métalliques.

-Détection de défauts dans les isolants ou les composants internes non visibles.

10. Méthodes de Diagnostic par Analyse d'Harmoniques

Description

Les harmoniques dans les systèmes électriques peuvent indiquer des défauts dans l'alimentation, comme des problèmes de tension ou des déséquilibres de phase. L'analyse des harmoniques permet de diagnostiquer ces anomalies.

Application

Analyse de la qualité de l'alimentationpour détecter des distorsions de la forme d'onde du courant ou des problèmes dans les filtres.

11. Méthodes par Contrôle Non Destructif (CND)

Description

Le contrôle non destructif permet de diagnostiquer les défaillances sans endommager l'équipement. Cela inclut des tests par rayons X, par courants de Foucault ou par ultrasons.

Application

- Inspection par rayons X pour détecter des défauts internes.
- Utilisation de courants de Foucault pour inspecter les surfaces des composants métalliques.

12. Méthodes de Maintenance Prédictive et Diagnostic Avancé

Description

La maintenance prédictive utilise des données collectées à partir de différentes méthodes de diagnostic pour prédire la défaillance d'un équipement. Cela peut inclure des techniques d'intelligence artificielle et de machine learning pour analyser les tendances.

Application

- Utilisation des données collectées par des capteurs pour prédire les pannes avant qu'elles ne se produisent.
- Modélisation des tendances de défaillance à l'aide de systèmes avancés d'intelligence artificielle.

13. Techniques avancées basées sur l'intelligence artificielle



Figure III.7 : L'intelligence artificielle

- Utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique et d'observateurs comme ceux de Kalman pour détecter les anomalies complexes.[39.40]

- Ces approches permettent une surveillance prédictive et une prise de décision automatisée.

Comparaison des méthodes

Méthode	Avantages	Limites
Analyse vibratoire	Détection précise des défauts mécaniques	Moins efficace pour les défauts électriques
Analyse du courant statorique	Surveillance en ligne, économique	Interprétation complexe
Champ magnétique de dispersion	Non invasif, localisation précise	Peu répandue
Méthodes acoustiques	Simple et rapide	Sensible aux bruits environnants
Tests électriques	Diagnostic complet	Nécessite parfois un arrêt
Techniques IA	Prédiction avancée	Complexité technique

En résumé, le choix de la méthode dépend du type de défaut à diagnostiquer, des ressources disponibles et du contexte industriel. Une combinaison de ces techniques est souvent utilisée pour maximiser l'efficacité du diagnostic.

III.13. Conclusion

En conclusion du troisième chapitre, qui a porté sur le diagnostic des défauts dans les machines électriques par l'analyse des signaux, nous avons présenté les principales méthodes et techniques utilisées pour détecter les défauts mécaniques et électriques affectant la performance de ces machines. Ce diagnostic précis contribue à améliorer la maintenance, à réduire les arrêts

imprévus, et ainsi à augmenter l'efficacité de fonctionnement tout en prolongeant la durée de vie des équipements.

En passant à la quatrième partie, nous allons nous concentrer sur les machines asynchrones, qui constituent une part importante des applications industrielles. Ces machines présentent plusieurs avantages, notamment une conception simple, un coût de fabrication réduit, une maintenance facilitée, et une bonne efficacité de fonctionnement sous différentes charges. Leur capacité à fonctionner dans des environnements difficiles et leur robustesse face aux défauts en font un choix privilégié dans de nombreux secteurs industriels.

Ainsi, la prochaine partie étudiera en profondeur les machines asynchrones à cage , en détaillant leurs caractéristiques, leur mode de fonctionnement, ainsi que leur importance dans l'industrie. Nous aborderons également les méthodes de diagnostic et d'analyse des défauts spécifiques à ces machines afin d'assurer leur fonctionnement optimal et durable.

Chapitre IV : Analyse et simulation des défauts dans les machines asynchrones

1- Introduction :

Le moteur à induction, également appelé moteur asynchrone, est l'un des moteurs électriques les plus utilisés dans le domaine industriel en raison de son efficacité et de sa fiabilité. Sa principale caractéristique réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui lui confère une conception simple, robuste et facile à entretenir et à fabriquer. Pour analyser précisément son comportement en régime transitoire et permanent, l'élaboration d'un modèle mathématique s'avère indispensable.

Dans ce chapitre, nous avons commencé par un rappel du modèle mathématique de la machine asynchrone à cage, suivi par une simplification des équations à l'aide de la transformation de Park. Nous avons ensuite présenté les propriétés des différents systèmes de référence, ainsi que les équations mathématiques — magnétiques, électriques et mécaniques — qui régissent le comportement de la machine dans chacun de ces repères. Cette approche vise à modéliser la machine asynchrone triphasée sous forme d'une machine biphasée équivalente. Enfin, après avoir choisi un repère approprié, nous avons établi le modèle d'état de la machine asynchrone.

2- Description de la machine asynchrone

Les machines asynchrone, appelées également machine à induction sont des convertisseurs électromagnétiques tournants transformant l'énergie électrique en énergie mécanique, elles sont utilisées en moteur bien qu'elles puissent fonctionner en générateur [58].

La machine asynchrone à cage est constituée de deux parties, le stator et le rotor. Le stator représente la partie statique de la machine. Il est constitué d'un circuit magnétique comportant de multiples encoches à l'intérieur desquelles sont

bobinées par trois enroulements formant les enroulements statoriques. Au centre de ce cylindre, on retrouve le rotor de la machine dont le circuit magnétique est composé des barres généralement en cuivre ou en aluminium coulé. Ces barres sont reliées entre elles à chaque extrémité par un anneau de court-circuit[58].

Les photographies suivantes fig. (1-1) présentent la machine asynchrone et ses principales composantes que sont le stator et le rotor[58].



Figure (IV.1) : représentation de la machine asynchrone avec le stator et le rotor

3- Hypothèses simplificatrices

Afin de définir et simplifier le modèle de la machine asynchrone, certaines hypothèses simplificatrices sont à prendre en considération [59] :

- Parfaite symétrie de construction.
- La force magnétomotrice créée par le bobinage à une forme sinusoïdale.
-les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- Le stator est considéré comme lisse et l'entrefer constant .

4- Mise en équation de la MAS

La machine asynchrone triphasée est représentée schématiquement par la fig. (IV-2). Elle est munie de six enroulements .Le stator de la machine est formé de trois enroulements (A, B, C) fixes décalés de 120° dans l'espace et traversés par trois courants variables.Le rotor peut être modélisé par trois enroulements (a,b,c)

identiques décalés dans l'espace de120°, ces enroulements sont en court-circuit et la tension à leurs bornes est nulle [60].

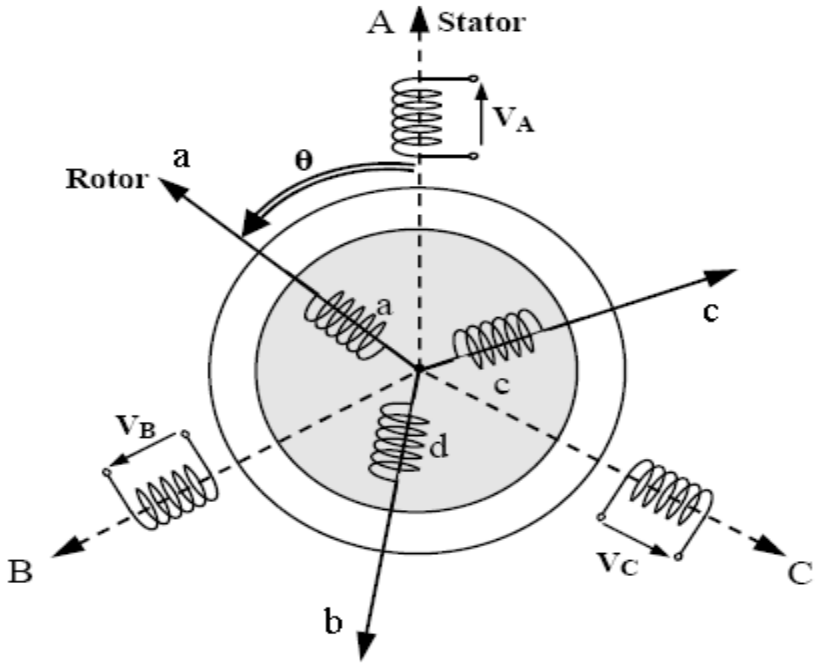


Figure (IV-2) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

4.1Equations électriques :

La loi de Faraday permet d'écrire [60] :

$$v = R.i + \frac{d}{dt}\phi \qquad [IV.1]$$

En appliquant la loi de Faraday à chaque enroulement de la machine représentée par la figure (2-2), on peut écrire :

$$[V_s] = R_s.[i_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \qquad [IV.2]$$

$$[V_r] = R_r.[i_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \qquad [IV.3]$$

Avec :

$$[V_s] = [V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc}]^T, [V_r] = [V_{ra} \quad V_{rb} \quad V_{rc}]^T \qquad [IV.4]$$

$$[i_s] = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T, [i_r] = [i_{ra} \quad i_{rb} \quad i_{rc}]^T \qquad [IV.5]$$

$$[\phi_s] = [\phi_{sa} \quad \phi_{sb} \quad \phi_{sc}]^T, [\phi_r] = [\phi_{ra} \quad \phi_{rb} \quad \phi_{rc}]^T \qquad [IV.6]$$

Les matrices des résistances statorique et rotorique de la MAS sont données par:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad [IV.7]$$

Les trois enroulements r_a, r_b, r_c sont en court-circuit d'où:

$$[V_r] = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad [IV.8]$$

4.2Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants. Elles sont exprimées sous forme matricielles comme suit [60] :

$$\begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad [IV.9]$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_s \end{bmatrix} \quad [IV.10]$$

$$[M_{sr}]' = [M_{rs}]' = M_{sr} . \begin{bmatrix} \cos\theta_s & \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_s & \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_s \end{bmatrix} \quad [IV.11]$$

On obtient finalement le modèle asynchrone triphasé :

$$[V_{sabc}] = [R_s] . [i_{sabc}] + \left(\frac{d}{dt}\right) \{[L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}]\} \quad [IV.12]$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] . [i_{rabc}] + \left(\frac{d}{dt}\right) \{[M_{rs}][i_{sabc}] + [L_r][i_{rabc}]\} \quad [IV.13]$$

4.3Equation mécanique :

La relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire :

$$C_e - C_r = J . \frac{d\Omega}{dt} + F . \Omega$$

[IV.14]

Où :

C_e : représente le couple moteur appliqué.

C_r : représente le couple résistant.

J : le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes.

F : le coefficient de frottement.

On obtient ainsi la vitesse en appliquant la transformée de Laplace :

$$\Omega = \frac{C_{em} - C_r}{Js + F} \qquad [IV.15]$$

Où S représente la variable de Laplace, cette équation montre que le contrôle de la vitesse passe par le contrôle du couple.

4.4Transformation de PARK

Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, on transforme le système réel triphasé en système biphasé équivalent, ce dernier consiste à remplacer tous enroulements statoriques par deux enroulements, l'un sur l'axe (U) et l'autre sur l'axe (V). [59]

La transformation qui traduit ce passage du système triphasé au système biphasé (U, V) est dite transformation de PARK et donnée par :

$$\begin{bmatrix} X_U \\ X_V \\ X_O \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} \qquad [IV.16]$$

Avec :

X : Tension, courant ou flux.

"O" : indice de l'axe homopolaire.

"U" : indice de l'axe (U).

"V" : indice de l'axe (V).

On a ajouté les composantes homopolaires pour équilibrer la transformation (ces composantes sont égales à zéro dans le cas d'un système triphasé équilibré).

[P] : est la matrice de PARK, définie par :

$$[P]=\frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta_{obs}) & \cos(\theta_{obs}-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{obs}+\frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_{obs}) & -\sin(\theta_{obs}-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{obs}+\frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

[IV.17]

θ_{obs}: L'angle d'observation dans la matrice [P] (écart angulaire entre l'axe "A" du système triphasé et l'axe (U) du système biphasé.

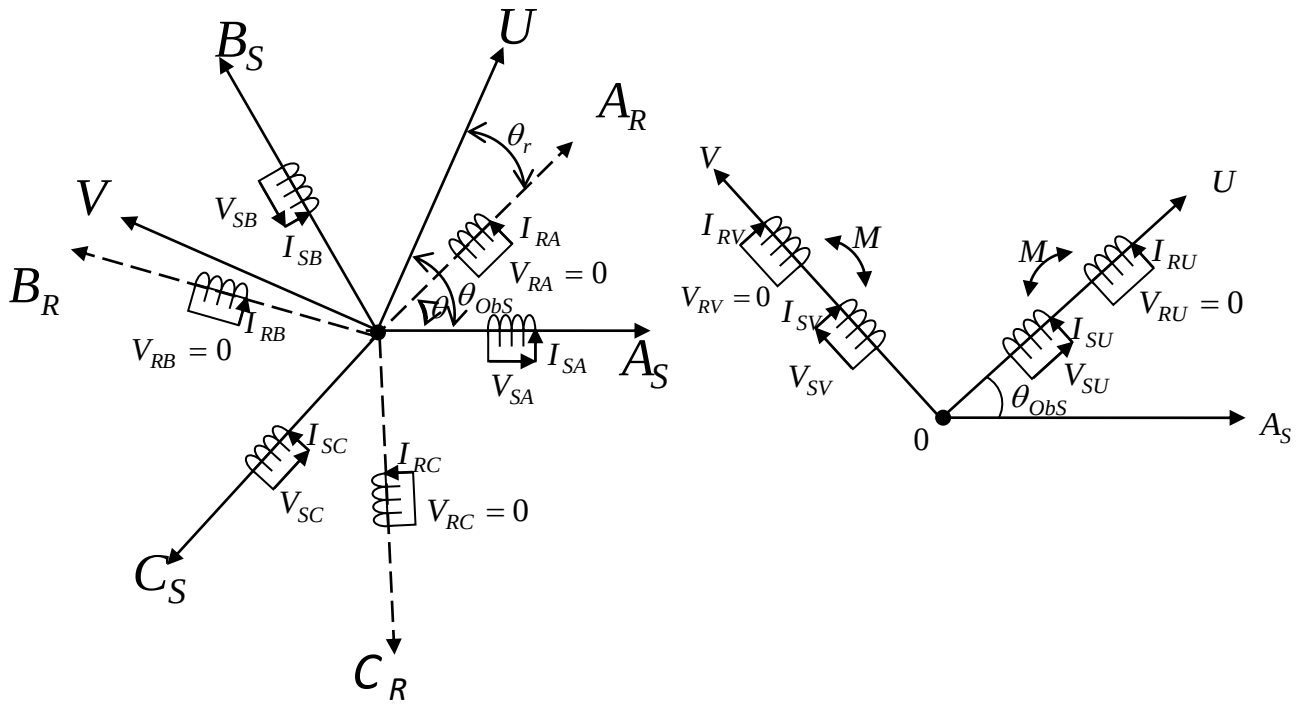


Figure (IV-3) : représentation schématique de modèle triphasé réel et modèle biphasé équivalente de la machine asynchrone

4.5Modèle de Park de la machine asynchrone triphasé :

Après avoir effectué les transformations précédentes, le modèle de la machine dans le référentiel de PARK (tournant à une vitesse quelconque (w_{ObS}) par rapport au stator est le suivant :

4.6.1Equations électriques :

$$\begin{cases} V_{SU} = R_S.I_{SU} + \dfrac{d}{dt}\Phi_{SU} - w_{ObS}.\Phi_{SV} \\ V_{SV} = R_S.I_{SV} + \dfrac{d}{dt}\Phi_{SV} + w_{ObS}.\Phi_{SU} \\ 0 = R_R.I_{RU} + \dfrac{d}{dt}\Phi_{RU} - (w_{ObS} - w)\Phi_{RV} \\ 0 = R_R.I_{RV} + \dfrac{d}{dt}\Phi_{RV} + (w_{ObS} - w)\Phi_{RU} \end{cases} \quad [IV.18]$$

Avec :

$$w_{ObS} = w_r + w \; w = \frac{d}{dt}\theta = p.\Omega \; w_r = \frac{d}{dt}\theta_r \; w_{ObS} = \frac{d}{dt}\theta_{ObS} \quad [IV.19]$$

4.6.2Equations magnétique:

$$\begin{cases} \Phi_{SU} = L_S.I_{SU} + M.I_{RU} \\ \Phi_{SV} = L_S.I_{SV} + M.I_{RV} \\ \Phi_{RU} = L_R.I_{RU} + M.I_{SU} \\ \Phi_{RV} = L_R.I_{RV} + M.I_{SV} \end{cases} \quad [IV.20]$$

Avec :

$L_S = l_S - m_S$: Inductance cyclique propre du stator.

$L_R = l_R - m_R$: Inductance cyclique propre du rotor.

$M = \dfrac{3}{2}.m_{SR}$: Inductance cyclique mutuelle stator - rotor.

46.3Equations mécanique:

$$\begin{cases} C_e - C_r = J\dfrac{d\Omega}{dt} + f.\Omega \\ C_e = \dfrac{3M}{2L_R}\, p\, (\Phi_{RU}.I_{SV} - \Phi_{RV}.I_{SU}) \end{cases} \quad [\text{IV.21}]$$

4.7Choix du référentiel biphasé :

Le modèle de la machine a été présenté dans un repère biphasé (U, V) avec une orientation quelconque, cependant il existe déférents possibilités pour fixer l'orientation du repère et cela dépend généralement des objectifs de l'application, le choix du référentiel nous ramène pratiquement au trois cas possibles [3].

- Repère d'axes (α, β) : le système biphasé lié au stator $(\theta_{ObS} = 0)$
- Repère d'axes (d, q) : le système biphasé lié au champ tournant $(\theta_{ObS} = \theta_S)$
- Repère d'axes (x, y) : le système biphasé lié au rotor $(\theta_{ObS} = \theta)$

Avec :

θ_S : Angle électrique de rotation du champ tournant

4.7.1 Référentiel lié au stator (α, β) :

Les équations de la machine asynchrone dans le repère (α, β) lié au stator prennent la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{S\alpha} = R_S.I_{S\alpha} + \dfrac{d\Phi_{S\alpha}}{dt} \\ V_{S\beta} = R_S.I_{S\beta} + \dfrac{d\Phi_{S\beta}}{dt} \\ 0 = R_R.I_{R\alpha} + \dfrac{d\Phi_{R\alpha}}{dt} + w_r.\Phi_{R\beta} \\ 0 = R_R.I_{R\beta} + \dfrac{d\Phi_{R\beta}}{dt} - w_r.\Phi_{R\alpha} \end{cases} \qquad [IV.22]$$

Ce référentiel possède des tensions et des courants réels et peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif [59].

4.7.2 Référentiel lié au champ tournant (d, q) :

Les équations de la machine asynchrone dans le repère (d, q) lié au champ tournant prennent la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{Sd} = R_S.I_{Sd} + \dfrac{d\Phi_{Sd}}{dt} - w_S.\Phi_{Sq} \\ V_{Sq} = R_S.I_{Sq} + \dfrac{d\Phi_{Sq}}{dt} + w_S.\Phi_{Sd} \\ 0 = R_R.I_{Rd} + \dfrac{d\Phi_{Rd}}{dt} - (w_S - w).\Phi_{Rq} \\ 0 = R_R.I_{Rq} + \dfrac{d\Phi_{Rq}}{dt} + (w_S - w).\Phi_{Rd} \end{cases} \quad [IV.23]$$

L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus facile de faire la régulation de ces grandeurs.

IV.5. Simulation

1. Introduction

Dans cette partie pratique du mémoire, une simulation précise du comportement du moteur asynchrone a été réalisée en utilisant l'environnement MATLAB/SIMULINK, dans le but d'analyser ses performances en conditions de fonctionnement normal ainsi qu'en présence de divers défauts électriques. La simulation constitue un outil avancé et efficace permettant de comprendre en profondeur la réponse des systèmes électriques, sans recourir à des expérimentations réelles coûteuses ou complexes.

L'étude a débuté par la modélisation du moteur en état sain, suivie par la simulation de plusieurs défauts potentiels, notamment des défauts au niveau du stator, du rotor, ainsi que des défauts de type fréquentiel. L'impact de ces anomalies a été analysé sur les principales grandeurs électriques telles que le courant, la tension et le couple électromagnétique.

Cette simulation vise à construire une base de connaissances précise permettant le diagnostic précoce des pannes, à travers l'analyse des signaux électriques et la détection des variations anormales dans le comportement du moteur. Les

résultats obtenus représentent une étape essentielle vers l'amélioration de la maintenance des machines et l'optimisation de leur rendement opérationnel.

2. Présentation du logiciel de travail

Cette étude s'appuie sur le logiciel MATLABet son environnement graphique SIMULINK**,** reconnus pour leur puissance en matière de modélisation et de simulation. MATLAB est une plateforme intégrée pour l'analyse de données et la modélisation mathématique de haute précision, tandis que SIMULINK permet une représentation visuelle souple des systèmes dynamiques à l'aide de schémas blocs.

Ce duo logiciel se distingue par sa capacité à simuler fidèlement le comportement réel des systèmes électromécaniques, ce qui en fait un choix idéal pour l'analyse des moteurs électriques en conditions normales ou en présence de défauts.

3. Simulation de la machine asynchrone

a. Cas d'une machine saine

Les figures précédentes présentent l'évolution des grandeurs électriques et mécaniques caractéristiques du fonctionnement de la machine asynchrone en état sain, c'est-à-dire en l'absence de tout défaut, lors du démarrage à vide de la machine, suivi de l'application d'un couple résistant de 4 N.m entre t = 2 s et t = 4 s.

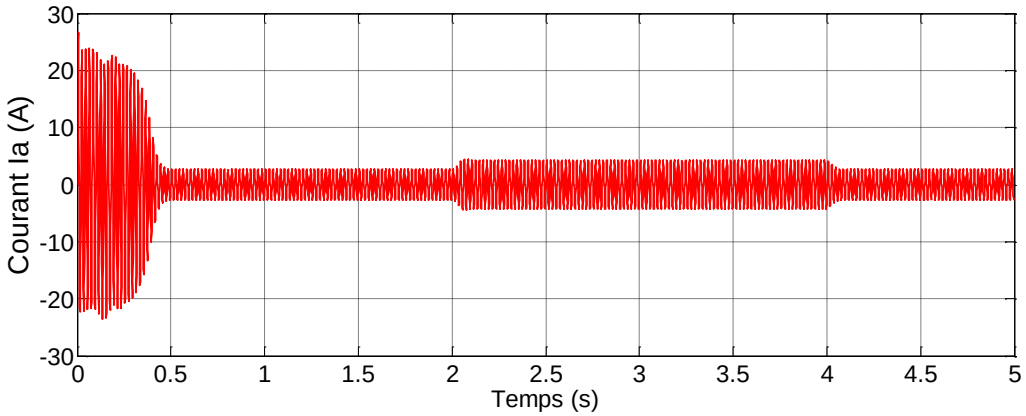


Figure (IV. 4) : Courant statorique de la phase (a) Ia

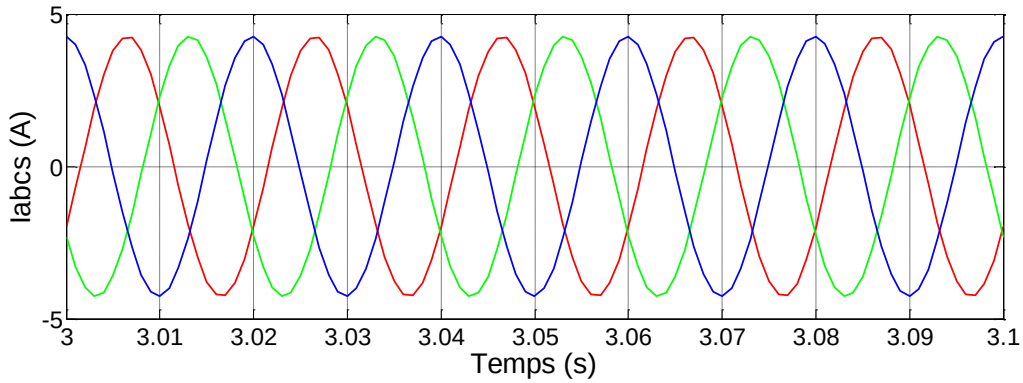


Figure (IV. 5) : les courants statoriques Iabc du MAS

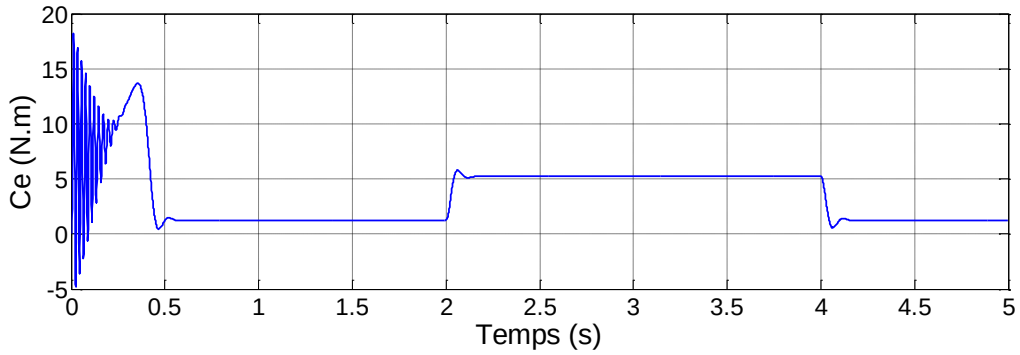


Figure (IV. 6) : couple électromagnétique du MAS

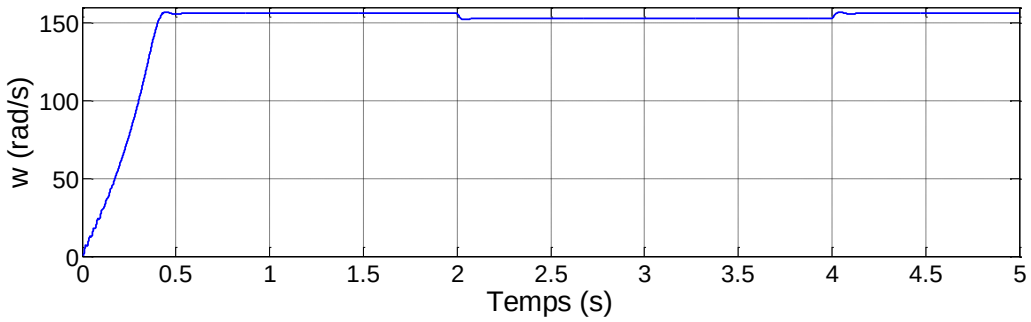


Figure (IV. 7) : la vitesse de rotation du MAS

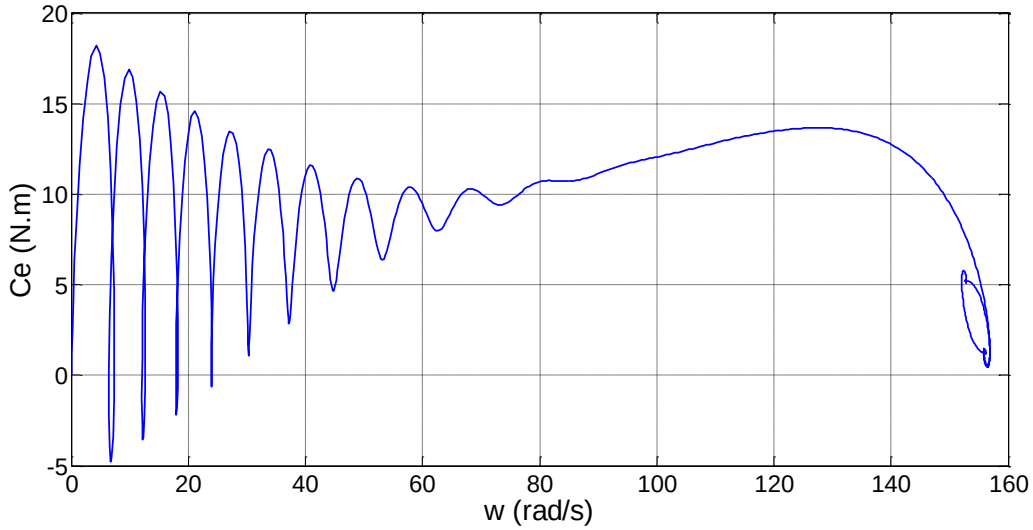


Figure (IV. 8) : la caractéristique mécanique du MAS, Ce=f(w)

Interprétation des résultats

- **Courbe du courant statorique Ia (0 à 5 s)**

Cette courbe montre le comportement du courant dans la phase A durant un cycle complet de 5 secondes :

- Au démarrage, on observe un pic transitoire important dû à l'appel de courant initial. C'est un comportement classique lors du démarrage direct d'une machine asynchrone.
- Après cette phase transitoire, le courant devient quasi sinusoïdal et stable en amplitude, indiquant que la machine a atteint son régime permanent.
- L'absence d'ondulation ou d'instabilité majeure témoigne d'un fonctionnement équilibré et sans défaut.

- **Courbe des courants Iabc (entre 3 et 3.1 s)**

Cette figure offre un zoom sur les trois phases (A, B, C) pendant une courte période :

- Les trois courants sont sinusoïdaux, équilibrés et en déphasage de 120°, ce qui confirme un état de fonctionnement sain.

- Aucune composante continue ou déséquilibre n'est détecté, ce qui valide la symétrie de l'alimentation triphasée.

- Courbe du couple électromagnétique Ce (0 à 5 s)

- Le couple présente de fortes pulsations au démarrage, caractéristiques du régime transitoire où la machine doit vaincre l'inertie mécanique.

- Il se stabilise progressivement pour atteindre un niveau constant en régime permanent, nécessaire pour compenser les pertes mécaniques (frottement, ventilation).

- L'évolution douce après 1 seconde témoigne d'un bon comportement dynamique de la machine.

- Courbe de la vitesse angulaire ω\ω (0 à 5 s)

- La vitesse démarre à zéro, puis augmente progressivement pour se stabiliser autour de 150 rad/s (≈ 1432 tr/min).

- Cette montée progressive est due à l'inertie des parties tournantes, et la stabilisation après environ 0,5 s marque l'atteinte du régime permanent.

- L'absence d'oscillations après la stabilisation indique un fonctionnement stable et sans vibrations anormales.

- Courbe Ce en fonction de ω\ω

- Cette courbe représente la relation entre le couple électromagnétique et la vitesse.

- On y observe une augmentation du couple avec la vitesse en phase transitoire, jusqu'à atteindre un point d'équilibre en régime permanent.

- La courbe illustre bien le comportement dynamique typique d'une machine asynchrone, où le couple diminue légèrement lorsque la vitesse s'approche de la synchronisation.

- Ces résultats, obtenus en l'absence de défauts, permettent de valider la robustesse du modèle développé et constituent une référence de comparaison indispensable pour l'étude des cas défectueux, qui seront abordés dans la section suivante.

b. Cas pour un défaut de déséquilibre d'alimentation sur une phase

Dans cette section, les résultats concernent le comportement de la machine asynchrone soumise à un défaut d'alimentation de type "masque de tension" sur la phase 1, simulé dans une plage temporelle de 0 à 5 secondes. Les différentes courbes permettent d'analyser l'impact de ce défaut sur les grandeurs électriques et mécaniques.

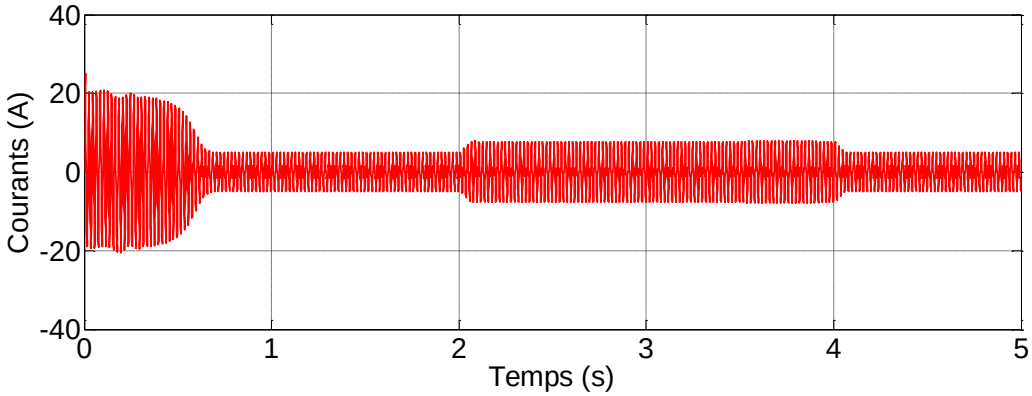


Figure (IV. 9) : Courant statorique de la phase (a) Ia

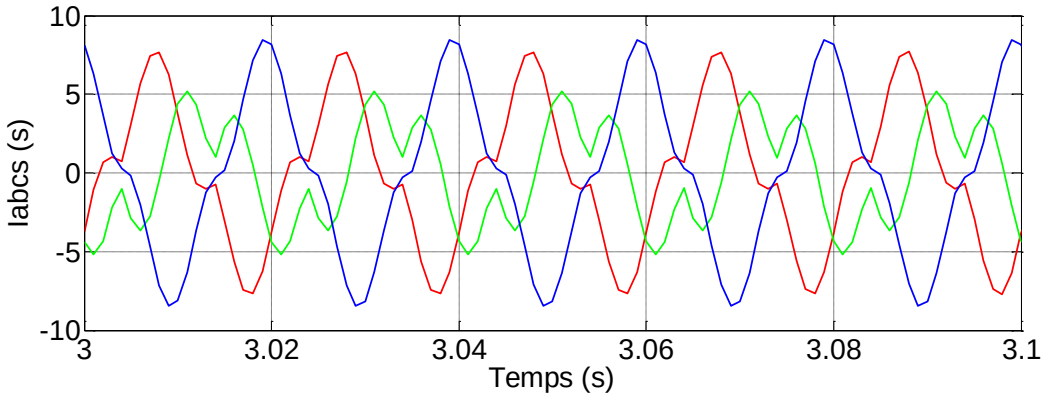


Figure (IV. 10) : les courants statoriques Iabc du MAS

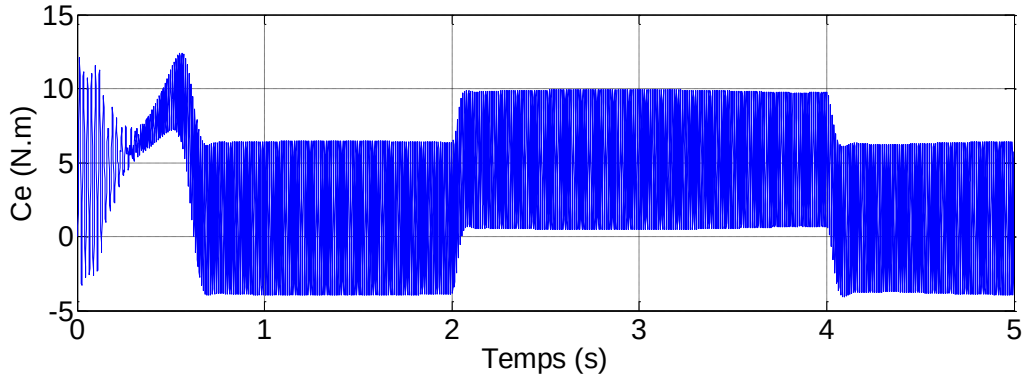


Figure (IV. 11) : couple électromagnétique du MAS

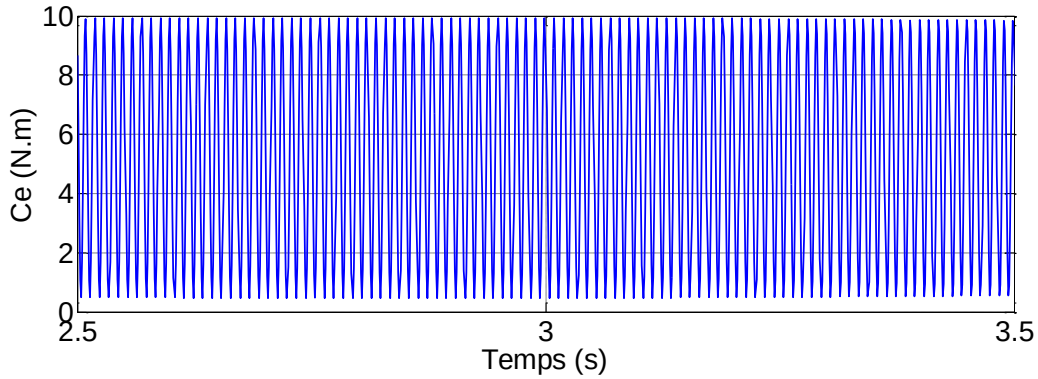


Figure (IV.12) : Zoom sur le couple électromagnétique

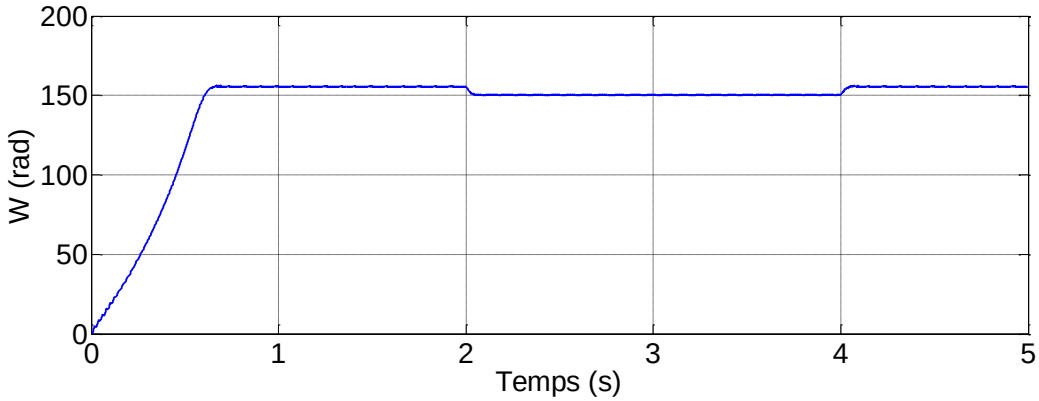


Figure (IV. 13) : la vitesse de rotation du MAS

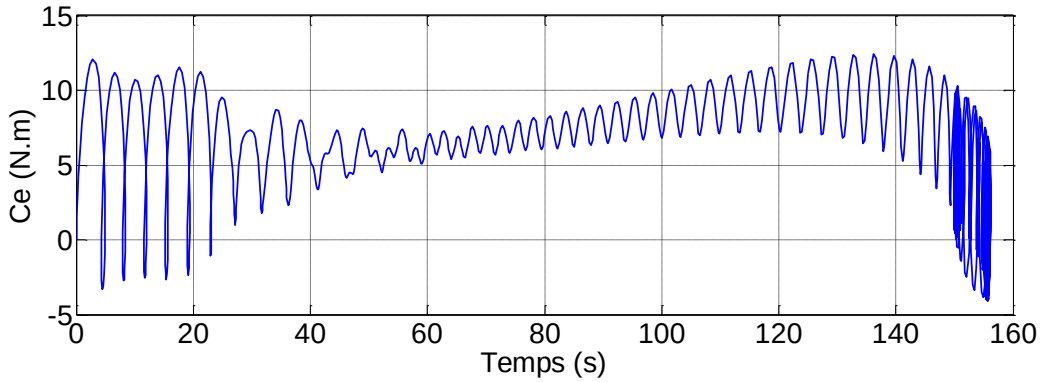


Figure (IV. 14) : la caractéristique mécanique du MAS, Ce=f(w)

Interprétation des résultats

- **Courants statoriques**

La courbe des courants statoriques montre un déséquilibre marqué entre les phases, observable par l'asymétrie des amplitudes. La phase défectueuse présente une réduction significative de son courant, tandis que les autres phases réagissent en compensation.

Ce déséquilibre est typique d'une baisse de tension unilatérale (ici sur la phase 1), qui induit une distribution inégale du flux magnétique dans la machine, avec pour conséquence un fonctionnement anormal et déséquilibré du champ tournant.

- **Courants Iabc – Zoom**

Le zoom temporel sur les courants triphasés confirme ce déséquilibre.

Les courants ne sont plus parfaitement sinusoïdaux, et le décalage de phase entre les composantes est perturbé.

L'amplitude réduite sur la phase concernée par le défaut provoque des composantes harmoniques susceptibles d'engendrer des échauffements anormaux et une usure prématurée de la machine.

- **Couple électromagnétique Ce**

Le couple électromagnétique présente de fortes irrégularités, particulièrement visibles entre 2,5 s et 3,5 s, période correspondant à la phase active du défaut.
On observe une ondulation accrue du couple, traduisant une perturbation dans la conversion électromécanique.
Ces variations sont susceptibles de se transmettre à la charge mécanique, provoquant des vibrations et sollicitations dynamiques supplémentaires.

- **Courbe Ce selon la vitesse**

Cette représentation montre une relation instable entre le couple et la vitesse, avec des fluctuations visibles autour des valeurs moyennes.
Le comportement dynamique est perturbé, ce qui est cohérent avec le déséquilibre de phase observé au niveau de l'alimentation.

- **Vitesse angulaire ω\ω**

La courbe de la vitesse angulaire indique une réduction notable de la vitesse de rotation en comparaison avec le fonctionnement sain.
On remarque une chute progressive de la vitesse durant la période de défaut, ce qui reflète la perte de couple utile et la diminution de la puissance électromagnétique transmise au rotor.
La vitesse ne parvient pas à se stabiliser complètement, témoignant de la détérioration de la performance de la machine sous ce type de défaut.

-Les résultats mettent en évidence les effets néfastes d'un déséquilibre de tension sur une phase d'alimentation. Ce type de défaut engendre des courants déséquilibrés, une perturbation du couple électromagnétique, une baisse de la vitesse, et donc un fonctionnement instable de la machine. Ces analyses permettent de valider la sensibilité du modèle aux défauts asymétriques, ce qui est essentiel pour le diagnostic et la mise en place de stratégies de maintenance prédictive.

c. Cas pour un défaut de déséquilibre d'alimentation sur deux phases

Les courbes obtenues correspondent à un scénario où la machine asynchrone triphasée démarre directement avec un déséquilibre de tension : deux phases statoriques sont alimentées à 110 V, tandis que la troisième phase reste alimentée à 220 V. Ce type de défaut, présent dès le démarrage, engendre des perturbations importantes sur l'ensemble des grandeurs électriques et mécaniques de la machine.

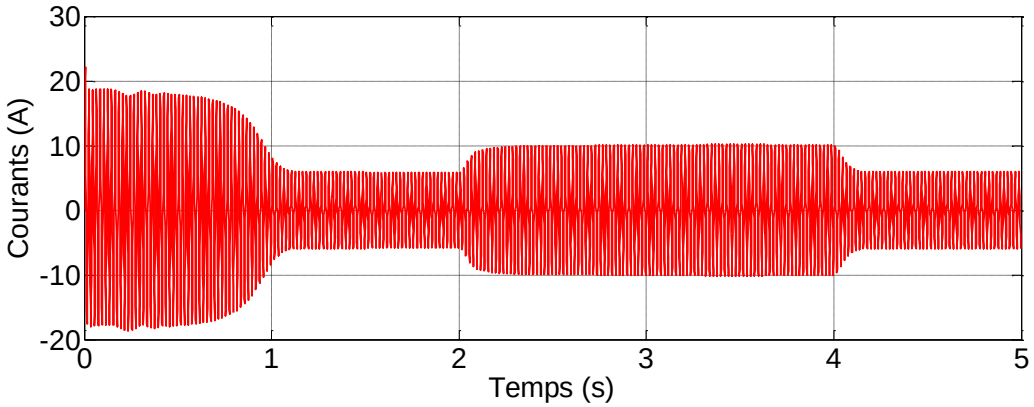
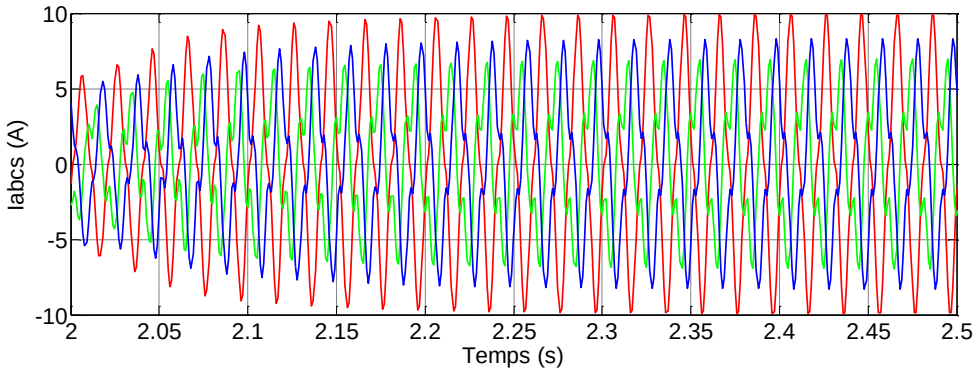


Figure (IV. 15) : Courant statorique de la phase (a) Ia



Figure(IV.16) :les courants statoriques Iabc du MAS

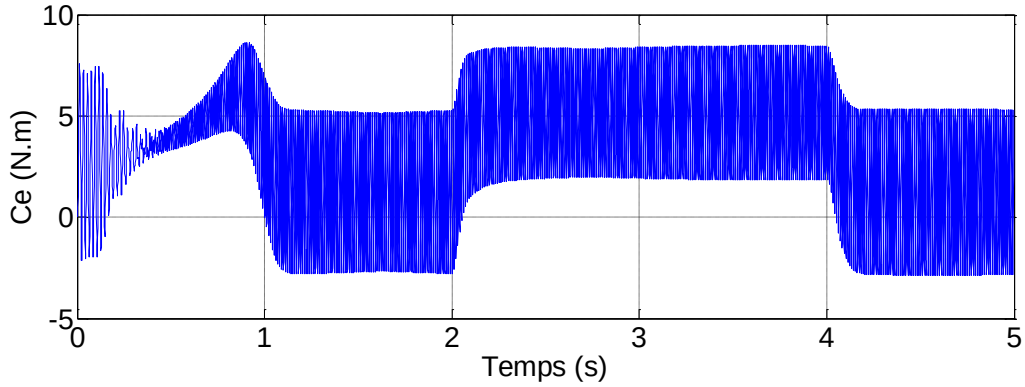


Figure (IV.17) : couple électromagnétique du MAS

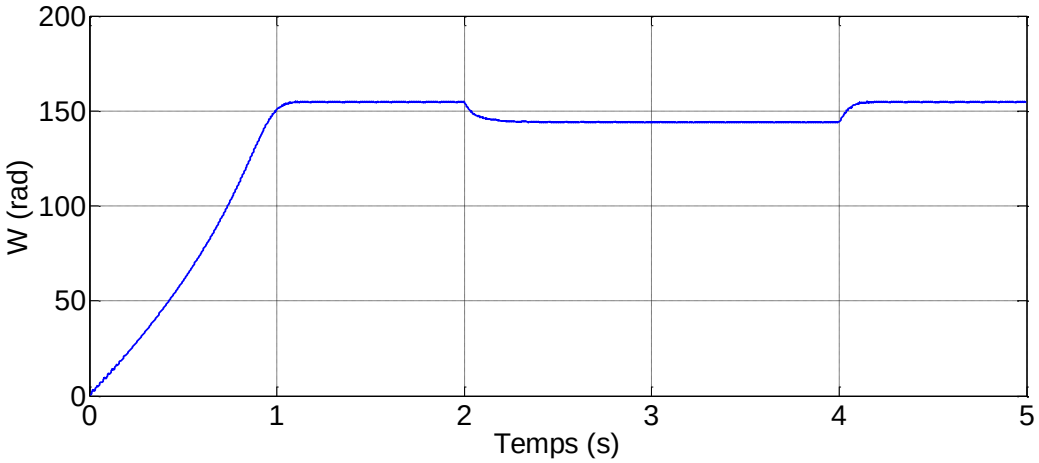


Figure (IV.18) : la vitesse de rotation du MAS

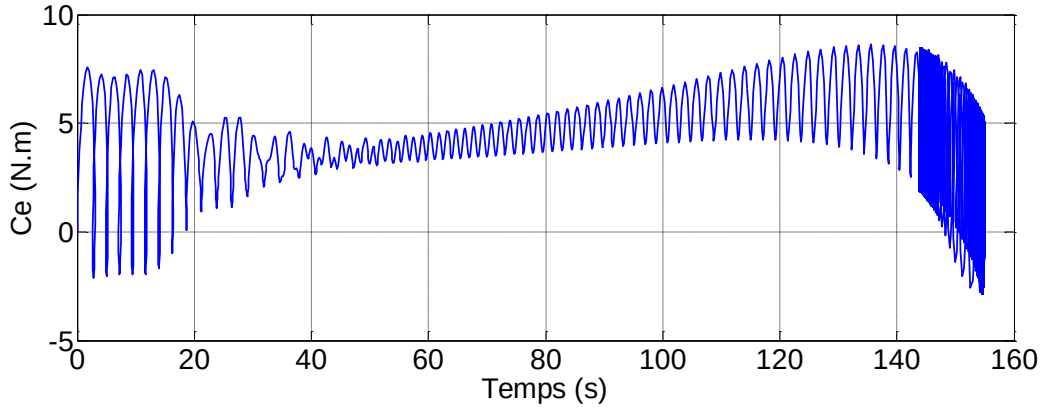


Figure (IV. 19) : la caractéristique mécanique du MAS, Ce=f(w)

Interprétation des résultats

- **Courant statorique Ia**

- Le courant de la phase A montre immédiatement, dès t=0t = 0t=0, une augmentation brusque avec une forme fortement déformée, en raison du déséquilibre de tension initial.
  L'appel de courant, déjà élevé au démarrage en situation normale, est ici exacerbé par l'alimentation asymétrique, provoquant des valeurs de crête plus importantes et un comportement instable.
  Durant toute la période de simulation, le courant conserve une forme irrégulière, traduisant une tentative de la machine de stabiliser son champ tournant malgré l'alimentation déséquilibrée.
- **Courants triphasés IabcI**

Dès le démarrage, les trois courants sont visiblement déséquilibrés :

-Les deux phases sous-alimentées (110 V) présentent des amplitudes réduites ;

-La phase alimentée à 220 V montre une amplitude beaucoup plus élevée, perturbant la symétrie du système.

Ce déséquilibre engendre une composante de séquence négative qui nuit à la régularité du champ magnétique tournant, provoquant des fluctuations électromagnétiques et un rendement réduit.

- **Couple électromagnétique Ce**

Le couple électromagnétique, dès les premiers instants, présente des oscillations intenses et un niveau instable, en réponse au fonctionnement déséquilibré.
Plutôt que d'augmenter de manière progressive comme dans un démarrage sain, le couple évolue de façon chaotique, indiquant une perturbation grave dans la conversion électromécanique.

Il atteint une valeur moyenne suffisante pour entraîner la charge, mais au prix de fortes ondulations et efforts dynamiques accrus.

- **Vitesse angulaire ω\ω**

La vitesse de rotation du rotor monte plus lentement qu'en régime sain en raison de la faible efficacité du couple produit au démarrage.
Une fois la vitesse proche de sa valeur nominale, elle reste inférieure à la référence, traduisant une augmentation permanente du glissement induit par la perte de performance du champ tournant déséquilibré.
De légères oscillations de vitesse apparaissent, corrélées aux variations du couple.

- **Courbe Ce en fonction de ω\ω**

La courbe du couple électromagnétique en fonction de la vitesse présente une trajectoire irrégulière dès le début, contrairement à un démarrage sain caractérisé par une montée progressive.
On y observe une relation non linéaire et agitée, conséquence directe de l'alimentation asymétrique.
Cette dynamique illustre l'instabilité énergétique de la machine, qui tente de compenser les déséquilibres électriques au détriment de la stabilité mécanique.

- Le démarrage sous déséquilibre de tension sur deux phases perturbe fortement le fonctionnement de la machine asynchrone :

- Les courants sont asymétriques et instables ;
- Le couple électromagnétique est ondulant ;
- La vitesse reste inférieure à la valeur nominale.

Ce type de défaut, s'il est prolongé, peut entraîner une surchauffe des enroulements, des vibrations mécaniques, et à terme, une dégradation

prématurée de la machine.

L'étude de ces courbes confirme l'intérêt de la modélisation pour la détection précoce de ce genre d'anomalies.

d. Cas pour un défaut suite à une baisse de fréquence

Dans le cadre de cette étude, nous avons analysé le comportement dynamique d'un moteur asynchrone (MAS) soumis à un défaut, tout en étant alimenté par une fréquence réduite de 47 Hz. Plusieurs courbes caractéristiques ont été examinées, notamment les courants statoriques triphasés, le couple électromagnétique et la vitesse angulaire du rotor.

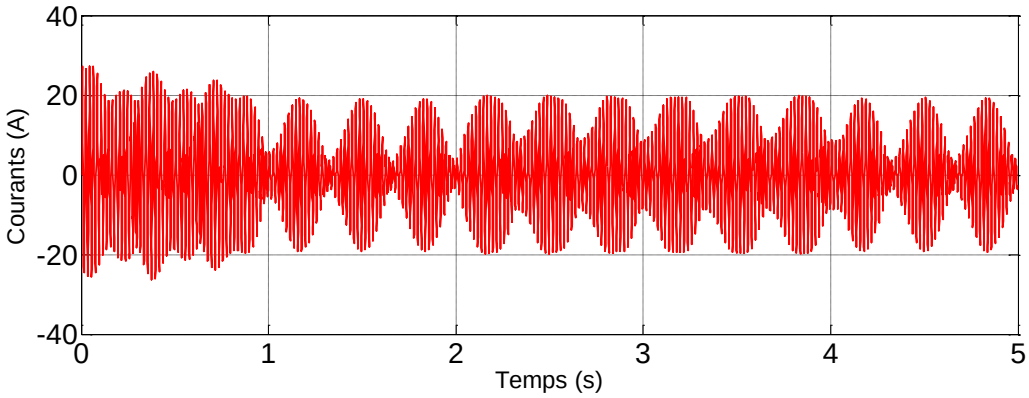


Figure (IV. 20) : Courant statorique de la phase (a) Ia

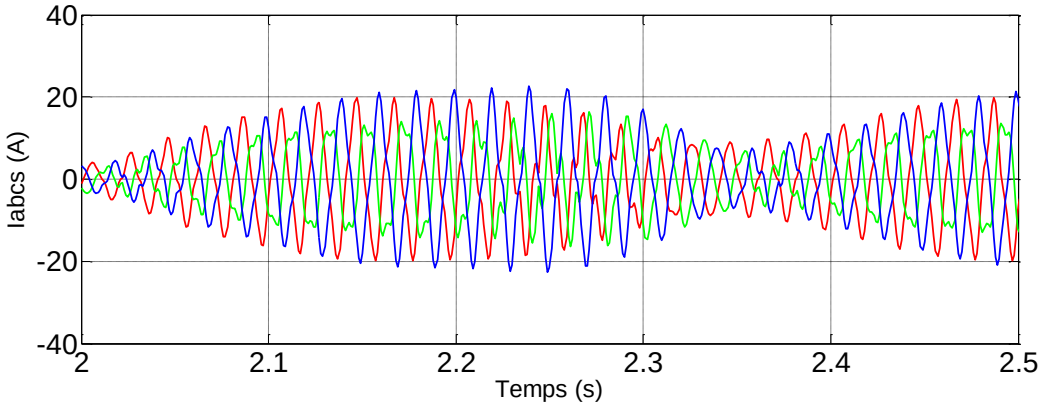


Figure (IV. 21) : les courants statoriques Iabc du MAS

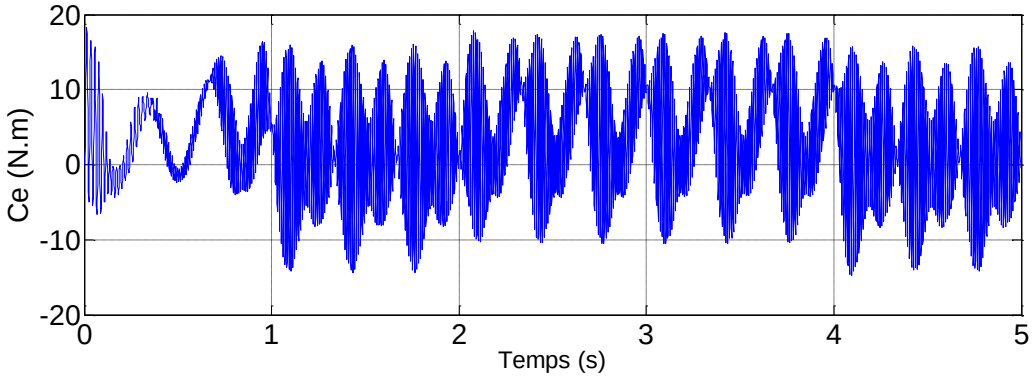
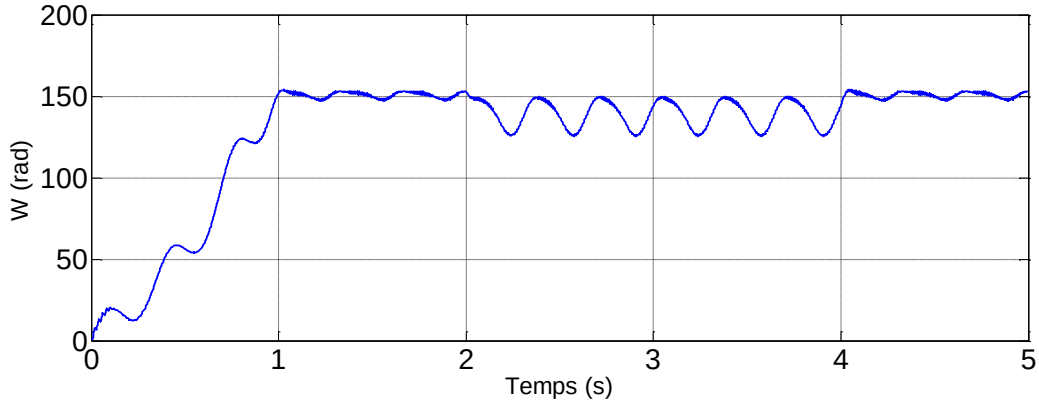


Figure (IV. 22) : couple électromagnétique du MAS



Figure(IV.23) : la vitesse de rotation du MAS

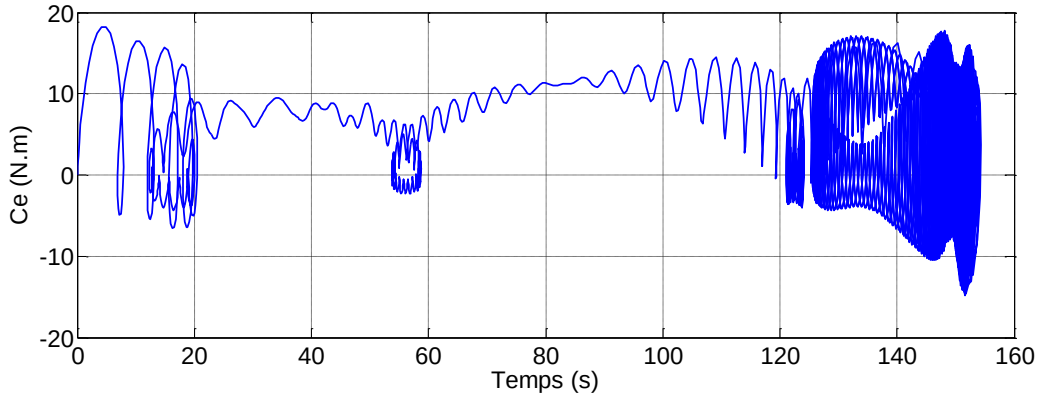


Figure (IV. 24) : la caractéristique mécanique du MAS, Ce=f(w)

Interprétation des courbes en présence d'un défaut dans le MAS alimenté à une fréquence réduite (f = 47 Hz)

- **Courants statoriques triphasés (Ia, Ib, Ic)**

L'analyse des courants montre des oscillations périodiques typiques d'un régime sinusoïdal, cependant, un léger déséquilibre entre les trois phases est observable. Ce déséquilibre peut être attribué à la présence du défaut qui affecte l'uniformité du champ magnétique tournant. De plus, la diminution de la fréquence d'alimentation entraîne une augmentation du flux magnétique, ce qui peut provoquer une surintensité dans les enroulements si la tension d'alimentation n'est pas ajustée en conséquence.

- **Couple électromagnétique (Ce)**

La courbe du couple électromagnétique révèle des oscillations marquées et irrégulières, avec des pics significatifs et même des passages négatifs. Ce comportement traduit une instabilité dynamique du moteur, causée par la combinaison du défaut interne et de la baisse de fréquence. Ces fluctuations du couple peuvent générer des vibrations mécaniques, une usure prématurée des composants, voire une perte de synchronisme partielle dans des cas sévères.

- **Vitesse angulaire du rotor (ω)**

La vitesse angulaire présente une montée progressive vers un régime permanent, mais la valeur finale reste inférieure à la vitesse nominale, ce qui est cohérent avec la réduction de la fréquence d'alimentation. En effet, la vitesse de synchronisme est proportionnelle à la fréquence, selon la relation :

$$ns=(120*f)/p$$

où :

- ns est la vitesse synchrone en tours par minute (tr/min),
- f est la fréquence du réseau en Hz,
- p est le nombre de pôles du moteur.

Ainsi, une fréquence de 47 Hz engendre mécaniquement une réduction de la vitesse maximale atteignable par le moteur.

- **Comportement transitoire à court terme**

Une deuxième courbe du couple, représentée sur une échelle temporelle plus courte, met en évidence des fluctuations rapides, typiques d'un phénomène transitoire instable. Ces oscillations peuvent être dues à une interaction entre le défaut interne (déséquilibre des enroulements, défaut d'isolement, etc.) et la dynamique du système rotorique sous une alimentation non optimale.

-L'analyse met en évidence les effets conjugués d'un défaut dans le moteur asynchrone et d'une baisse de la fréquence d'alimentation. Ces deux facteurs perturbent significativement le comportement électrique et mécanique du système, se traduisant par :

- un déséquilibre des courants statoriques,
- une instabilité du couple électromagnétique,
- une baisse notable de la vitesse de rotation.

e. Cas pour un défaut de court circuit entre spires

Ce scénario concerne l'étude du comportement dynamique d'un moteur asynchrone (MAS) soumis à un défaut interne de type court-circuit entre spires au niveau de l'un des enroulements statoriques. Plusieurs grandeurs électriques et mécaniques ont été analysées pour évaluer l'impact de ce défaut sur le fonctionnement global du moteur.

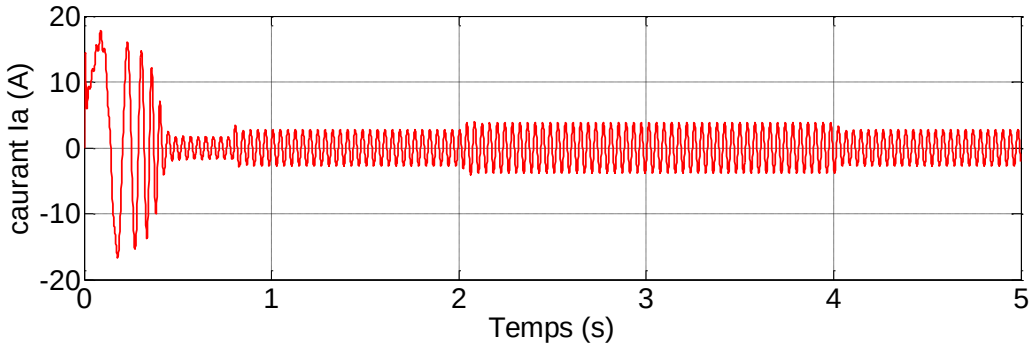


Figure (IV. 25) : Courant statorique de la phase (a) Ia

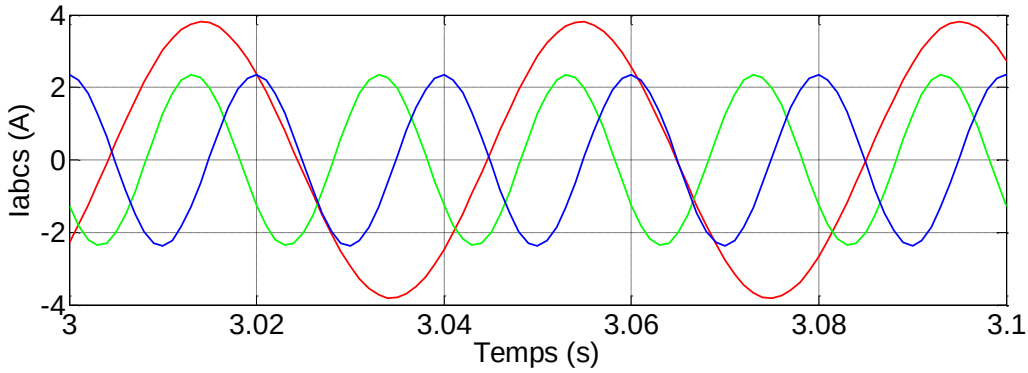


Figure (IV. 26) : les courants statoriquesIabc du MAS

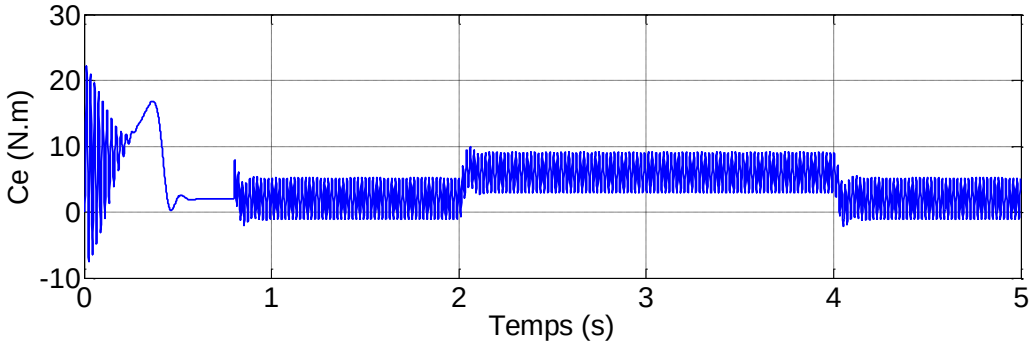
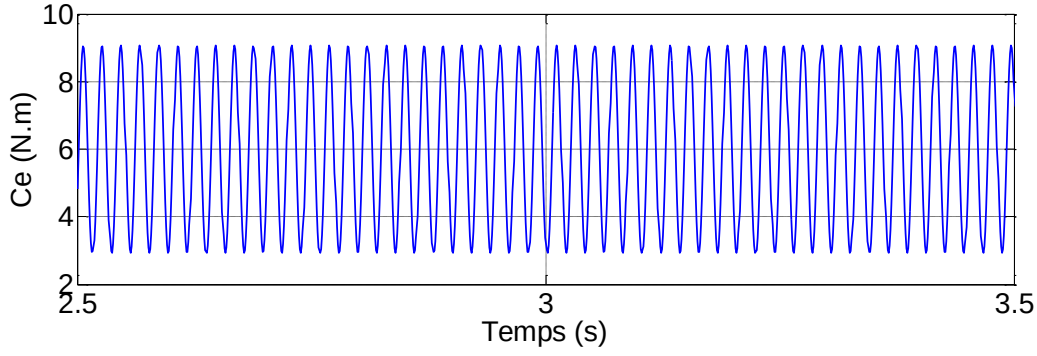


Figure (IV. 27) : couple électromagnétique du MAS



Figure(IV.28) : Zoom sur le couple électromagnétique

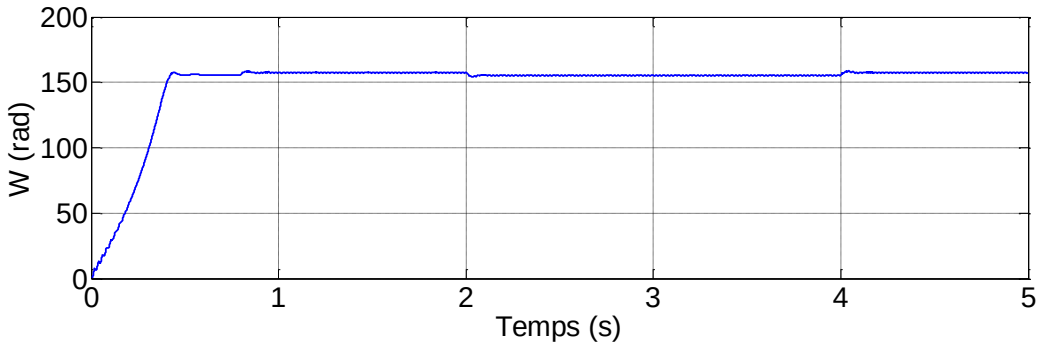


Figure (IV. 29) : la vitesse de rotation du MAS

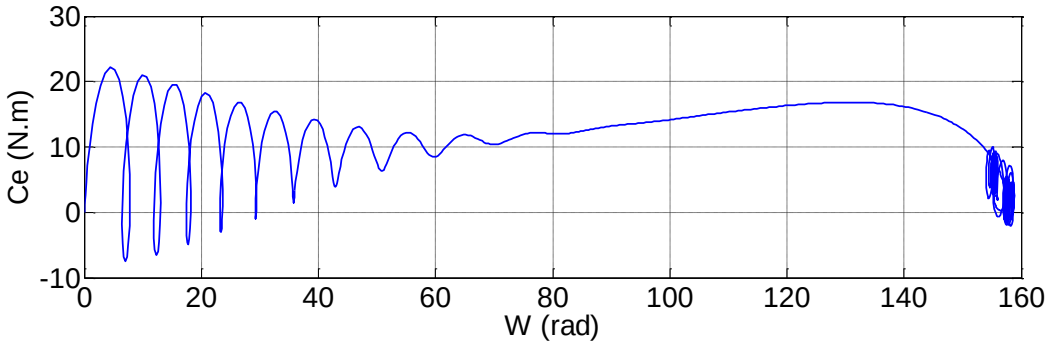


Figure (IV. 30) : la caractéristique mécanique du MAS, Ce=f(w)

Interprétation des courbes en présence d'un court-circuit entre spires dans un moteur asynchrone

- **Courant statorique (Ia)**

La courbe du courant Ia montre une forme d'onde globalement sinusoïdale, mais perturbée par de légères distorsions harmoniques, notamment vers les extrémités des cycles. Ces perturbations sont typiques d'un défaut localisé dans un enroulement. Le court-circuit entre spires provoque une augmentation locale du courant dans la phase affectée, créant un échauffement et une déformation du champ magnétique.

- **Courants triphasés (Iabc)**

L’analyse des trois phases simultanées met en évidence un déséquilibre clair entre les courants, principalement visible dans l’amplitude et la forme d’onde. Ce déséquilibre est une signature typique d’un court-circuit entre spires, où l’enroulement affecté présente une impédance réduite, modifiant ainsi la répartition du courant entre les phases.

- **Couple électromagnétique (Ce)**

La courbe du couple montre des oscillations significatives, avec des variations rapides autour d’une valeur moyenne. Le couple électromagnétique présente une instabilité transitoire liée aux perturbations magnétiques introduites par le court-circuit. Une deuxième courbe du couple, représentée sur une échelle temporelle restreinte, révèle des oscillations plus détaillées à court terme, renforçant l’hypothèse d’un défaut ponctuel et localisé dans les enroulements.

- **Vitesse angulaire (ω)**

La vitesse angulaire du rotor croît jusqu’à atteindre un régime permanent autour de 180–200 rad/s. Toutefois, elle présente de légères oscillations superposées, en lien avec les variations du couple moteur. Ces fluctuations sont le reflet direct des déséquilibres électromagnétiques introduits par le défaut. Bien que le moteur atteigne un régime de fonctionnement, la stabilité mécanique est compromise.

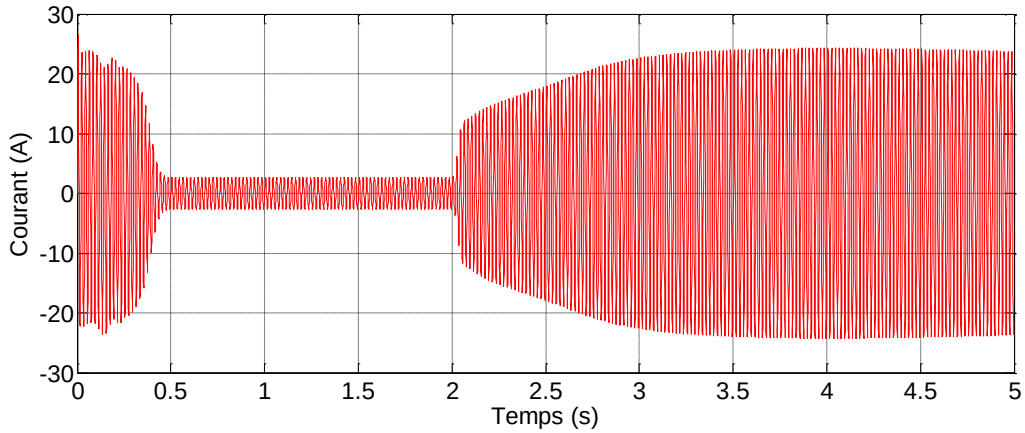
-Le court-circuit entre spires constitue un défaut interne critique pouvant affecter profondément les performances du moteur asynchrone. L’analyse des courbes simulées permet de conclure :

- Présence de courants déséquilibrés et déformés.
- Oscillations importantes du couple, réduisant l’efficacité mécanique.
- Stabilité dynamique dégradée, malgré un fonctionnement en régime établi.

Ce type de défaut, s'il n'est pas détecté et traité à temps, peut entraîner une détérioration progressive de l'isolant, voire un court-circuit total de phase, menaçant la sécurité et la durabilité du système.

f. Cas pour un défaut rotorique

Ce cas d'étude porte sur l'analyse du comportement d'un moteur asynchrone (MAS) affecté par un défaut rotorique, typiquement une barre rompue ou un défaut de circuit dans la cage du rotor. Ce type de défaut génère une perturbation caractéristique à la fois dans le domaine électrique (courants, couple) et mécanique (vitesse de rotation).



Figure(IV.31) : Courant statorique de la phase (a) Ia

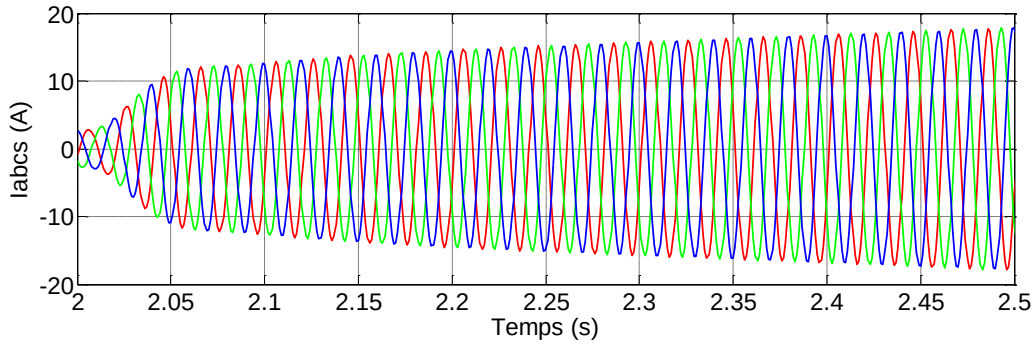


Figure (IV. 32) : les courants statoriques Iabc du MAS

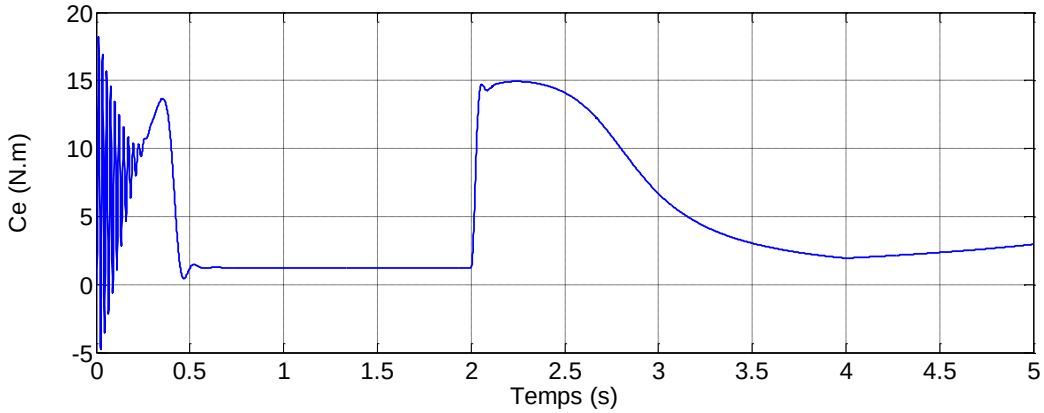


Figure (IV. 33) : couple électromagnétique du MAS

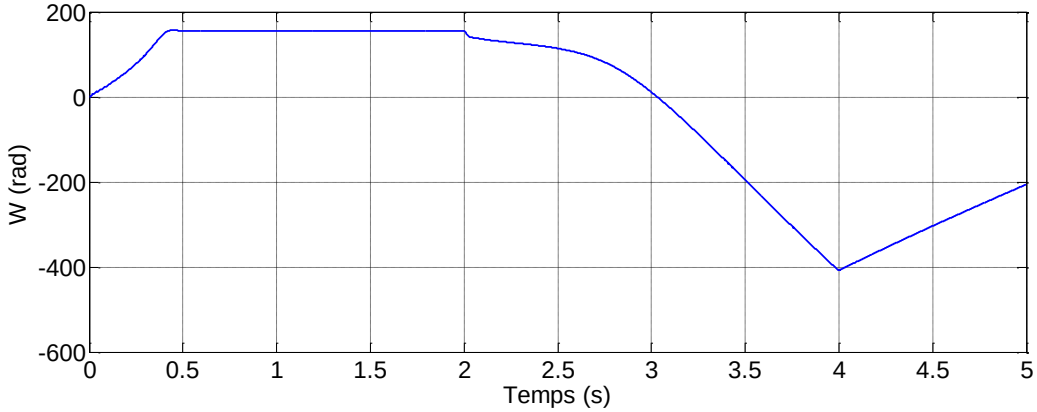
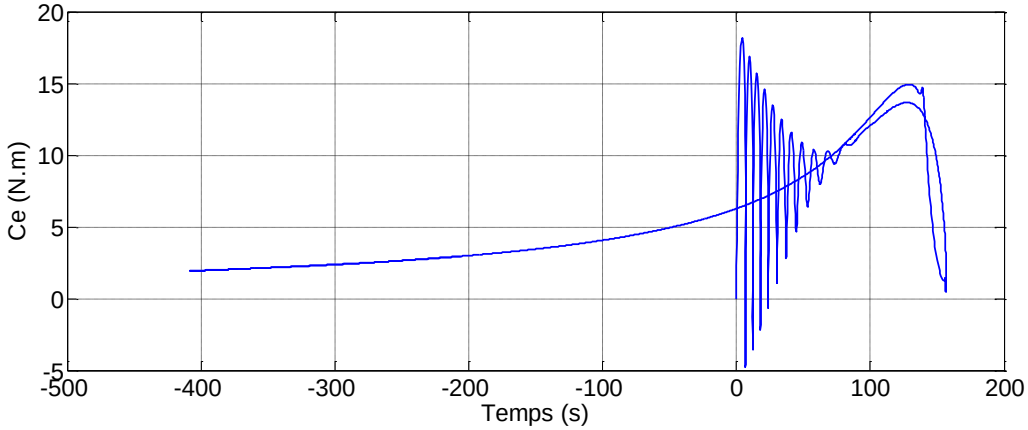


Figure (IV. 34) : la vitesse de rotation du MAS



Figure(IV.35) : la caractéristique mécanique du MAS, Ce=f(w)

Interprétation des courbes en présence d'un défaut rotorique dans un moteur asynchrone (MAS)

- **Courant statorique (Courant total et Iabc)**

L’analyse du courant statorique révèle des oscillations irrégulières avec des amplitudes variables au cours du temps. Les courants triphasés (Ia, Ib, Ic) montrent un déséquilibre net, avec une distorsion visible sur certaines phases. Ce comportement est typique d’un défaut asymétrique du rotor, qui perturbe l’induction équilibrée du champ magnétique tournant.

Les barres rompues ou fissurées du rotor modifient la répartition des courants induits, ce qui entraîne l’apparition de composantes harmoniques dans les courants statoriques, souvent à des fréquences proches de :

$f_{défaut}=f(1\pm2s)$

où f est la fréquence du réseau, $f_{défaut}$ est la fréquence du défaut et s le glissement.

- **Couple électromagnétique (Ce)**

Le couple électromagnétique présente de fortes oscillations dans le temps, tant en amplitude qu’en fréquence. Ce comportement traduit une variation cyclique du flux magnétique, induite par l’irrégularité du rotor. Une partie du couple passe sous zéro à certains instants, signe d’un fort déséquilibre électromagnétique qui peut induire des à-coups mécaniques, des vibrations ou une perte d’efficacité énergétique.

La seconde courbe du couple, représentée sur une plage de valeurs négatives à positives, accentue la visibilité de ces oscillations irrégulières et confirme l’impact significatif du défaut rotorique sur la stabilité du couple moteur.

- **Vitesse angulaire (ω)**

La vitesse angulaire du rotor, initialement instable, atteint un régime de croisière tout en conservant des fluctuations notables. Ces dernières sont étroitement

corrélées aux variations du couple. Le défaut rotorique empêche le moteur de maintenir une vitesse parfaitement stable, ce qui peut compromettre les performances globales du système entraîné.

-Le défaut rotorique étudié dans cette simulation met en lumière les perturbations suivantes :

- Déséquilibre marqué des courants statoriques, indicatif d'une perte de symétrie du champ tournant.
- Oscillations sévères du couple électromagnétique, avec impact potentiel sur la mécanique du système.
- Instabilité de la vitesse de rotation, susceptible de générer des vibrations et d'endommager l'arbre moteur ou la charge entraînée.

Ce type de défaut est difficile à détecter sans outils d'analyse temporelle et fréquentielle avancés (FFT, analyse de l'enveloppe, etc.), ce qui justifie l'intérêt croissant pour les techniques de diagnostic par traitement du signal dans la maintenance prédictive des machines asynchrones.

6. Paramètres de la machine asynchrone employée

Tension nominale	220/380 V
Fréquence	50 Hz
Courant nominal	6.4/3.7 A
Vitesse nominale	1440 tr/min
Puissance nominale	1.5 Kw
Nombre de paires de pôles	$p = 2$
Résistance statorique par phase	5.69 Ω
Résistance rotorique par phase	4.48 Ω
Inductance cyclique du stator	0.46 H

Inductance cyclique du rotor	0.73 H
Inductance mutuelle cyclique	0.55 H
Moment d'inertie de la partie tournante	0.0238 Kg.m2
Frottement	0.008

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entrepris une analyse détaillée du comportement des machines asynchrones en situations normales et en présence de divers types de défauts électriques. Après avoir rappelé les principes fondamentaux de la modélisation mathématique de la MAS, notamment à travers la transformation de Park et le choix judicieux du référentiel, nous avons pu établir un modèle d'état précis permettant une simulation fidèle du moteur.

Grâce à l'outil MATLAB/SIMULINK, plusieurs scénarios de défauts ont été simulés, allant du déséquilibre de tension (monophasé et biphasé), à la baisse de fréquence, au court-circuit entre spires, jusqu'aux défauts rotorique de type barre rompue. Pour chaque cas, une analyse approfondie des grandeurs caractéristiques (courants statoriques, couple électromagnétique, vitesse angulaire) a permis d'identifier les signatures électriques et mécaniques associées à chaque anomalie.

Les résultats obtenus confirment la pertinence de la simulation numérique dans la compréhension du comportement dynamique des moteurs, et mettent en lumière l'importance de la détection précoce des défauts pour assurer la fiabilité, la sécurité et la longévité des équipements industriels. Ce travail constitue ainsi une base solide pour le développement de méthodes de diagnostic avancées basées sur l'analyse des signaux électriques.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, nous avons abordé un sujet d'une grande importance dans le domaine de l'électrotechnique industrielle : le diagnostic des défauts dans les machines électriques par l'analyse des signaux. Ce sujet s'inscrit dans une problématique réelle et actuelle liée à la fiabilité, la sécurité, et la continuité du fonctionnement des systèmes industriels utilisant des machines électriques, notamment les moteurs asynchrones.

L'objectif principal de ce mémoire a été de comprendre, modéliser et simuler le comportement des machines asynchrones en présence de divers défauts, afin de proposer des méthodes efficaces pour leur détection et leur diagnostic.

Dans le premier chapitre, nous avons commencé par présenter une vue d'ensemble des machines électriques. Nous avons détaillé leur classification (machines synchrones, asynchrones, transformateurs...), les principes de fonctionnement de chaque type, et les composants principaux tels que le stator, le rotor, les enroulements, etc. Cette base théorique a permis de mieux appréhender le fonctionnement normal des machines avant d'aborder les défauts.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude des défauts électriques et mécaniques susceptibles d'affecter les performances des machines. Parmi les défauts analysés : les surtensions, les sous-tensions, les courts-circuits, les déséquilibres de phase, les défauts d'isolement, les casses de barres rotoriques, les défauts de roulements et d'alignement. Pour chaque type de défaut, nous avons expliqué les causes probables, les conséquences sur la machine, ainsi que les signatures caractéristiques observables.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes de diagnostic des défauts. Nous avons d'abord abordé les approches classiques basées sur l'analyse des signaux temporels et fréquentiels (FFT, analyse du spectre de courant…), puis les méthodes modernes faisant appel à des techniques avancées comme l'intelligence artificielle (réseaux de neurones, machines à vecteurs de support) et les méthodes statistiques. Ces outils permettent aujourd'hui de détecter précocement les anomalies, de classifier les défauts, et même de prédire leur apparition.

Dans le quatrième chapitre, nous avons appliqué nos connaissances à un cas pratique à travers la modélisation et la simulation d'un moteur asynchrone sous MATLAB/Simulink. Nous avons simulé son fonctionnement en état sain, puis sous différents scénarios de défauts :

- baisse de tension sur une phase,

- hausse de tension avec charge,
- déséquilibre triphasé,
- variation de fréquence,
- court-circuit partiel dans l'enroulement statorique,
- défauts dans la cage du rotor.

Pour chaque cas, nous avons extrait les signaux électriques caractéristiques tels que les courants statoriques, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation. L'analyse comparative des résultats nous a permis d'identifier les signatures spécifiques à chaque type de défaut, validant ainsi l'utilité du modèle pour le diagnostic.

Cette étude nous a permis de consolider nos connaissances théoriques, de manipuler un outil de simulation avancé, et surtout de comprendre l'impact réel des défauts sur le comportement dynamique d'une machine asynchrone.

Cependant, ce travail ne constitue qu'une première étape. Plusieurs perspectives peuvent être envisagées pour des travaux futurs :

- Étudier des défauts combinés (ex. : défaut électrique + défaut mécanique) ;
- Expérimenter les modèles avec des données réelles issues d'installations industrielles ;
- Intégrer des algorithmes d'apprentissage automatique pour la détection automatique de défauts ;
- Étendre l'étude à d'autres types de machines, comme les moteurs synchrones ou les machines à courant continu.

Enfin, ce mémoire montre clairement que le diagnostic des défauts dans les machines électriques, lorsqu'il est bien modélisé et correctement interprété, constitue un outil puissant pour la maintenance prédictive, la prévention des pannes, et l'optimisation de la durée de vie des équipements industriels.

Bibliographie

[1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A9lectrique

[2] https://www.pompe-moteur.fr/blog/fonctionnement-architecture-moteur-electrique-n20

[3] https://www.techno-science.net/definition/3169.html

[4] https://grupel.eu/fr/faqs/quels-sont-les-types-de-generateurs-de-courant-electrique/

[5] https://www.altasjenerator.com.tr/fr/blog-fr/linvention-des-generateurs-et-leur-developpement-au-fil-des-annees/

[6] https://fr.hydgetpower.com/info/types-of-power-transformers-92355702.html

[7] https://tameson.fr/pages/les-transformateurs-electriques-expliques

[8] https://seniadz.net/index.php/transformateurs-electriques-schema-roles-types-focntionnement/

[9] https://www.se.com/fr/fr/work/products/product-launch/guides/transformateur-electrique.jsp

[10] https://tameson.fr/pages/transformateurs-de-courant

[11] https://www.fuuu.be/polytech/ELECH300/CHAP2-ELEC-H-300.pdf

[12] https://www.pompe-moteur.fr/blog/fonctionnement-moteur-electrique-n14

[13] https://facsci.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2013/07/COURS-Electricit%C3%A9-Industrielle-4et5.pdf

[14] https://elearning.centre-univ-mila.dz/a-2023/pluginfile.php/90942/mod_resource/content/1/chapitre%2002.pdf

[15] https://www.essa-tlemcen.dz/wp-content/uploads/2018/01/Cours_Kerboua-1-51-ilovepdf-compressed.pdf

[16] https://www.univ-chlef.dz/ft/wp-content/uploads/2024/12/Polycopie-de-Machines-Electriques.pdf

[17] https://www.pompe-moteur.fr/blog/fonctionnement-moteur-electrique-n14

[18] https://www.hanzelmotor.net/news/electric-motor-components-73315361.html

[19] https://www.choisir.com/energie/articles/169678/les-differents-types-de-defaut-electrique

[20] https://theses.hal.science/tel-00518228/document

[21] https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/mokhnache_leila/files/defaillances-machines-l3elt_mokhnache.pdf?m=1587430253

[22] https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2017/07/These-Sakhara-Saadi-1.pdf

[23] http://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/11626/3/chpitre%201%20corrig%C3%A9.pdf

[24] http://moodle.univ-skikda.dz/moodle/pluginfile.php/62053/mod_resource/content/2/D%C3%A9faillances%C2%A0%20des%20%20machines%20%20cas%20%20de%20%20la%20%20machine%20%20asynchrone%C2%A0.pdf

[25] https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/7320/1/BOUAICHA.Abdelghafour_Belkacemi.Rabie.pdf

[26] http://thesis.univ-biskra.dz/1089/5/Chapitre%2003.pdf

[27] file:///C:/Users/DELL/Downloads/LEULMI%20616.pdf

[28] https://www.motac.fr/blog/2024/04/15/5-causes-frequentes-de-defaillance-des-roulements-de-moteurs-electriques

[29] https://www.fluke.com/fr/apprendre/blog/moteurs-variateurs-pompes-compresseurs/13-causes-frequentes-de-panne-de-moteur
[30] https://dynamox.net/en/blog/shaft-misalignment-and-its-contribution-to-mechanical-failures
[31] https://blog.formatis.pro/failures-of-the-electric-motors/
[32] https://easylaser.com/fr-fr/%C3%A0-propos-deasy-laser/blog/5-symptomes-de-d%C3%A9salignement
[33] https://www.fluke.com/fr/apprendre/blog/moteurs-variateurs-pompes-compresseurs/13-causes-frequentes-de-panne-de-moteur
[34] https://www.gamak.com/fr/entretien-et-utilisation-des-moteurs-electriques
[35] https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/9817/1/SADKI_Nour_elhouda.pdf
[36] file:///C:/Users/DELL/Downloads/sara,+8.pdf
[37] https://www.ase-serem.fr/qu-est-ce-que-l-analyse-vibratoire/
[38] https://www.ni.com/en/shop/labview/vibration-analysis-and-signal-processing-in-labview.html
[39] https://www.smaract.com/en/metrology/technologies/vibration-analysis
[40] https://towardsdatascience.com/vibration-data-and-a-few-techniques-to-analyze-it-549f311cd1e9/
[41]https://fr.farnell.com/guide-to-vibration-analysis-trc-ar
[42] file:///C:/Users/DELL/Downloads/analyse-d%C3%A9taill%C3%A9e-du-contenu-spectral-dans-le-courant-statorique-des-machines-asynchrones-sous-un-d%C3%A9faut-de-la-cassure-de-barres-rotoriques-en-utilisant-la-technique-de-la-mcsa-fft.pdf
[43] https://asjp.cerist.dz/en/article/112936
[44] http://thesis.univ-biskra.dz/1092/6/Chapitre%2003.pdf
[45] https://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_magn%C3%A9tique
[46]https://www.ipgp.fr/~grandin/Raphael_Grandin_personal_web_page/Teaching_files/4_milieux.pdf

[47] https://femto-physique.fr/electromagnetisme/biot-et-savart.php
[48] https://ipag.osug.fr/~ferreirj/enseignement/BChapitreI.pdf
[49]https://www.ipgp.fr/~grandin/Raphael_Grandin_personal_web_page/Teaching_files/4_milieux.pdf
[50] https://6-napse.com/competence/caracterisation-vibratoire-et-acoustique-des-materiaux/
[51] https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesures-acoustiques-et-vibratoires-42420210/
[52] https://perso.univ-lemans.fr/~jcpascal/Cours/ENSIM2A_Vibrations&Acoustique_1.pdf
[53] https://www.institut-langevin.espci.fr/methodes_multi_elements_en_acoustique
[54] https://www.belgelendirme.com/fr/test/elektriksel-testler/emc-testleri/esd-testi
[55] https://www.muayene.com/fr/laboratuvar/emc-testleri/elektrostatik-bosalma-testleri
[56]http://thesis.univ-biskra.dz/1089/3/Chapitre%2001.pdf
[57]file:///C:/Users/DELL/Downloads/AndrianCEBAN-these-3.pdf

[58] : Frank Morand, « technique d'observation sans capteur de vitesse en vue de la commande des machine asynchrones », Thèse de doctorat, école doctorale : électronique, électrotechnique, automatique de Lyon 2005.

[59] : B. Hadda, « Commande vectorielle de la machine à induction avec observateur de flux », Thèse d'ingénieur d'état, 2005, L'UNIVERSITE DE M'SILA.

[60] : Ch. Soufyane, « COMMANDE NEURO-FLOUE SANS CAPTEUR DE VITESSE D'UNEMACHINE ASYNCHRONE TRIPHASEE », Thèse de Magister, 2009, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technologique d'Oran

LES FIGURES :

Chapitre I

1 https://www.pompe-moteur.fr/3135-moteurs-mono-230v-055kw-1000-tr-min-moteur-electrique-monophase-1000-trmin-3701000141423.html

2 https://www.pompe-moteur.fr/447-moteurs-electriques-triphases-ais-230-400v-22kw-b3-1500-tr-mn-4p-moteur-electrique-triphase-1500-trmin-3700801704097.html

3 https://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/?id=119297&demande=desc

4 https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-generateur-10705/

5 https://tameson.fr/pages/les-transformateurs-electriques-expliques

Chapitre II

1 https://fr.scribd.com/document/345996843/Etude-Des-Differentes-Pannes-Des-Machines-Electriques-Et-Methodes-de-Leur-Detection

2 https://turgotlimoges.scenari-community.org/STI2D/Ressources%20STI2D/TP_WORKS%C2%A0/res/10_protec_biens_pers.eWeb/export/visu131.html

3 https://interventionrapide.over-blog.com/2019/08/identifier-les-defauts-electriques.html

4 https://protunisie.com/electricite/surtension-electrique/

5 https://serviziurgentimodena.it/pronto-intervento-elettricista/assistenza-elettrica/

6 https://www.researchgate.net/figure/Defaut-de-rupture-de-barres-et-danneau-de-court-circuit_fig3_354169480

7 https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/29002/1/HAMADA-MABEDI-MEDJOUDJ.pdf

8 https://www.researchgate.net/figure/Differents-types-dexcentricites_fig4_329773764

Chapitre III

1 https://www.ase-serem.fr/qu-est-ce-que-l-analyse-vibratoire/

2 https://www.memoireonline.com/05/20/11854/m_Analyse-vibratoire-et-estimation-de-la-duree-de-vie-residuelle-des-composants-mecaniques-de-guida14.html

3 https://www.semanticscholar.org/paper/Analyse-spectrale-du-courant-statorique-pour-les-de-Abdelkader-Noureddine/03959f1aff16008ab814e716a502f9e31ec240e6

4 https://www.leybold-shop.fr/vp3-3-4-3.html

5 https://www.pytaudio.com/test-bilan-et-controle-acoustique/

6 https://www.fluke.com/fr/apprendre/blog/qualite-du-reseau-electrique/test-conditions-reelles

7 https://industries.ma/lintelligence-artificielle-un-essor-revolutionnaire-et-ses-implications-a-lhorizon-2035/

Chapitre IV

1 https://electronique1.blogspot.com/2011/02/methodes-de-diagnostic-des-defauts-de.html

2 https://www.researchgate.net/figure/Representation-electrique-dun-moteur-asynchrone-triphasee_fig1_337447291

3 http://thesis.univ-biskra.dz/730/1/Elect_m1_2011.pdf